A. DUPONT

A. CASTELL

technologie

PROFESSIONNELLE GÉNÉRALE

professions de la mécanique

Classe de 2e
des Lycées Techniques

3e année des Collèges
d'Enseignement Technique

Préparation
au Baccalauréat
Technique
Classe de 1re T

DESFORGES
PARIS

OUVRAGES DES MÊMES AUTEURS

DUPONT A. et CASTELL A. — Technologie professionnelle générale :

Anciennes classes de 4e des Lycées techniques et classes de 1re année des Collèges d'enseignement technique, 1967.

Anciennes classes de 3e des Lycées techniques et classes de 2e année des Collèges d'enseignement technique, 1967.

Classes de 1re des Lycées techniques, de préparation au baccalauréat technique :

1re partie : Métrologie des surfaces, 1966.

2e partie : Étude fonctionnelle des machines-outils, 1966.

3e partie : Travaux réalisés sur les machines-outils, 1967.

CASTELL A. — Organisation industrielle :

Initiation — Conforme aux programmes de l'enseignement technique, classes de 1re, de technique industrielle, cours professionnels et de promotion sociale, 6e édition, 1965.

Applications Industrielles — Formation des techniciens et des cadres, classes de techniciens et techniciens supérieurs, 1958.

TECHNOLOGIE
PROFESSIONNELLE GÉNÉRALE

PROFESSIONS DE LA MÉCANIQUE

Classe de 2e des Lycées Techniques

3e année des Collèges d'Enseignement Technique

Classe de préparation
au Baccalauréat Technique, classe de 1re T.

A. DUPONT
PROFESSEUR TECHNIQUE, CHEF DE TRAVAUX
au Lycée Technique d'État d'Aulnay-sous-Bois

A. CASTELL
INGÉNIEUR A. ET M.
Directeur du Lycée Technique d'État de Corbeil-Essonnes

9e édition

DESFORGES
ÉDITEUR
29, quai des Grands-Augustins — Paris 6e
1967

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.
Copyright by DESFORGES Paris 1957.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

Essais mécaniques des matériaux

Propriétés mécaniques des métaux.

Ténacité, élasticité, dureté, résilience 11
Exemples de sollicitations simples d'un organe de machine 12

Essai de traction.

Eprouvettes 17
Machine d'essai 18
Diagramme de l'essai, caractéristiques déterminées 19

Essai de dureté.

Essai *Brinell*, principe de l'essai, caractéristiques de dureté, machine d'essai 23
Billage par la méthode de comparaison 25
Essai *Rockwell* 26
Essai *Vickers* 27
Comparaison des résultats 28

Essai de choc.

Eprouvettes 31
Machines d'essai et valeur de la résilience 32

Essais de fatigue.

Essai de flexion plane 34
Essai des efforts axiaux 34
Essai de torsion 34
Essai de flexion rotative 35

Essais de forge et d'emboutissage.

Essais de pliage 37
Essai de soudabilité 38
Essais d'emboutissage 38

Essais physico-chimiques.

Micrographie 40
Macrographie 40

Principaux métaux utilisés en construction mécanique

Les fontes.

Fontes de première fusion 45
Fontes de deuxième fusion : fonte grise et ses propriétés 46
Fonte blanche et ses propriétés 47
Fonte malléable 47
Fonte trempée, fontes spéciales 48

Les aciers.

Aciers au carbone 50
Propriétés des aciers au carbone 51
Aciers spéciaux de construction 51
Aciers spéciaux à outils 53
Désignation normalisée des aciers 55
Formes commerciales 58

Pages

L'aluminium et ses alliages.

L'aluminium et ses propriétés 63
Alliages d'aluminium de forge et de laminage 63
Alliages d'aluminium de fonderie 64
Travail mécanique des alliages d'aluminium 65

Le magnésium et ses alliages.

Le magnésium et ses propriétés 66
Alliages de magnésium de forge et de laminage 66
Alliages de magnésium de fonderie 67
Travail mécanique des alliages de magnésium 67
Désignation normalisée des alliages d'aluminium et de magnésium 67

Le cuivre et ses alliages.

Le cuivre et ses propriétés 70
Les bronzes et leurs propriétés 70
Les laitons et leurs propriétés 71
Travail mécanique du cuivre et de ses alliages 72
Désignation normalisée des alliages de cuivre 73

Les produits frittés.

Les carbures métalliques et leurs propriétés 73
Pièces mécaniques frittées 75

Les traitements thermiques

Moyens de chauffage.

Feu de forge 79
Fours à combustible solide, liquide ou gazeux 80
Fours électriques 81

Contrôle de la température.

Couleurs et éclats 82
Thermomètre à vapeur de mercure 82
Pyromètre thermo-électrique 83
Lunette à disparition de filament 84
Montres fusibles 84

Equilibre des alliages fer-carbone.

Fusion et solidification d'un corps pur, solidification d'un alliage 87
Transformations allotropiques du fer pur 88
Etude de l'alliage fer-carbone 89
Diagramme de transformation 90

La trempe.

Trempe des aciers : étude de la chauffe 94
Principe et buts de la trempe 94
Pratique de la trempe, accidents de trempe 95
Contrôle des résultats 98
Trempe du duralumin et caractéristiques modifiées 98

Le recuit.

Recuit des aciers, principe et buts du recuit 100
Pratique du recuit 101
Applications industrielles 102
Recuit des métaux non ferreux 102

Pages

Le vieillissement.

Vieillissement des pièces moulées 102
Vieillissement des pièces forgées 103

Le revenu.

But du revenu 103
Pratique du revenu 103
Comparaison des différents traitements thermiques et de leurs résultats 105

La cémentation.

Principe et but de la cémentation 107
Vitesse de cémentation 107
Réserves de cémentation 108
Procédés de cémentation 110
Accidents de cémentation 113
Contrôle de la dureté des pièces cémentées et trempées 114
Applications de la cémentation 114

La nitruration.

Principe et but de la nitruration 115
Aciers de nitruration, vitesse de nitruration 115
Réserves de nitruration 115
Pratique et applications de la nitruration 116

Protection des métaux contre la corrosion

La corrosion.

Causes de la corrosion des métaux 118
Facteurs favorisant la corrosion 118
Moyens de protection 119

Traitement des pièces à protéger.

Préparation des pièces 119
Protection des pièces 121

Métrologie

Erreurs dues aux appareils.

Défaut de justesse 127
Défaut de fidélité 129
Défaut de sensibilité 130

Erreurs dues à l'opérateur.

Erreurs de lecture 131
Erreurs dues aux maladresses de manipulation 131
Erreurs dues à la déformation des supports 132

Erreurs dues aux dilatations thermiques.

Dilatation linéaire 133
Correction des mesures 134

Elimination des erreurs.

Comparateurs mécaniques, comparateur pneumatique 138
Comparateurs optiques : micromesureur et interféromètre 138
Comparateurs électriques 146
Comparateurs électroniques 150

Pages

Contrôle des vérificateurs à dimensions fixes.

Nécessité et conditions du contrôle 154
Pratique du contrôle des calibres à limites 154

Mode d'action des outils

Etude des outils d'enveloppe.

Droite de plus grande pente 167
Valeur de l'angle de pente effective de coupe 168

Etude des outils de forme.

Généralités 170
Etude géométrique, différentes dépouilles 171
Outils profilés, outils à profil constant 171
Outil prismatique 175
Outil molette 176

Efforts sur les outils.

Action de la pièce sur l'outil et réaction de l'outil sur la pièce: tournage et rabotage. 183
Perçage, fraisage 184

Etude des ablocages.

Principes de l'ablocage : stabilité, dégauchissage et immobilisation de la pièce 189
Ablocage par pressions verticales 191
Ablocage par pressions latérales 192
Ablocage par pressions verticales et latérales 193

Vitesse de coupe.

Définition, généralités 196
Débit d'un outil, vitesse de moindre usure, vitesse économique 197
Choix de la vitesse de coupe 199

Facteurs dont dépend la vitesse de coupe.

Mode de travail 203
Nature du matériau à outil 204
Ténacité ou dureté du métal travaillé 204
Refroidissement de l'outil et de la pièce 205
Section du copeau, loi du débit constant 206

Correction de la vitesse de coupe.

Raisons de la correction de la vitesse de coupe 210
Exemples de correction pour le tournage 210
Exemples de correction pour le fraisage 213
Exemples de correction pour le perçage 214
Différents abaques et leur emploi 216

Vitesse de coupe pour les outils en carbures métalliques.

Généralités 220
Adaptation de la nuance du carbure au travail à exécuter 220
Différents abaques et leur emploi 222

AVANT-PROPOS

Ce livre, conforme aux programmes des classes de 2e des Lycées Techniques et aux classes de préparation de l'examen probatoire du baccalauréat technique fait suite à ceux précédemment parus pour les classes de 4e et de 3e; et, données complémentaires, le cours de la classe de 1re sera à consulter.

N'ayant pas varié dans notre conception de l'enseignement de la Technologie Générale et encouragé aussi dans la même voie par les nombreux Collègues qui ont adopté nos ouvrages, nous ne saurions mieux faire que de reproduire notre précédent avant-propos, dans son esprit tout au moins.

Nous avons donc continué à découper le programme en leçons, puisque ce découpage ne fait nullement obligation de s'y conformer servilement, et à faire suivre chaque leçon de son résumé afin d'essayer :

— de donner au maître le moyen de consacrer le temps maximum à son exposé et aux interrogations orales que nous jugeons préférables aux interrogations écrites;

— d'éviter les dictées fastidieuses de cours condensés, le plus souvent mal transcrites par l'élève.

Il sera toujours nécessaire d'illustrer ce résumé par des schémas essentiels relevés dans le livre.

Le programme officiel très vaste nous a contraint tout à la fois à nous limiter aux applications industrielles les plus marquantes et à nous étendre parfois au-delà de ce que nous considérons comme un niveau à ne pas dépasser. Nous avons pensé en effet que nos élèves, lorsqu'ils arriveront en fin de scolarité, auront acquis les connaissances de base et la maturité qui leur permettront de mieux comprendre, en se référant à ses données complémentaires, le cours de la classe de 1re.

Le programme de la 3e année des Collèges d'Enseignement Technique diffère assez sensiblement de celui que nous avons traité ici, mais les élèves de cette classe trouveront dans ce livre des compléments qui leur rendront les plus grands services pour la préparation aux examens du **C.A.P.** de la mécanique.

Par contre, cet ouvrage, bien que non spécialement rédigé pour la préparation de l'examen probatoire du baccalauréat technique est absolument conforme au programme de cet examen.

Comme précédemment, M. Castell, Ingénieur Arts et Métiers, Directeur du Lycée Technique d'État de Corbeil-Essonnes, nous a réservé son précieux concours pour la mise au point de ce livre. Son nom, inscrit en tête de l'ouvrage marque notre vive gratitude à son égard.

A. DUPONT.

PREMIÈRE PARTIE

ESSAIS DES MATÉRIAUX

Sollicitations simples agissant sur un organe mécanique.

Essai de traction.

Essai de dureté.

Essai de choc.

Essai de fatigue.

Essai de forge et d'emboutissage.

Essais physico-chimiques.

ESSAIS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

Les **propriétés mécaniques** des matériaux sont celles qui assurent à un organe la résistance aux **sollicitations,** ou **contraintes,** auxquelles il est soumis. Elles sont classées en fonction de la nature de la contrainte.

Cette classification trouve un intérêt pratique dans le choix du matériau en vue de la fonction que devra remplir l'organe.

I. — PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MÉTAUX

A. TÉNACITÉ

La ténacité est la résistance qu'opposent les corps à leur rupture sous un effort de déformation lente : traction ou extension (fig. 1), compression (fig. 2), flexion (fig. 3 et 4), cisaillement (fig. 5), torsion (fig. 6).

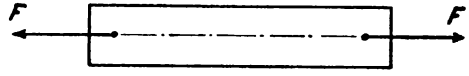


Fig 1 — *Schéma d'une pièce subissant une contrainte de traction, ou extension*

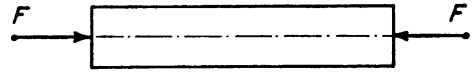


Fig 2 — *Schéma d'une pièce subissant une contrainte de compression*

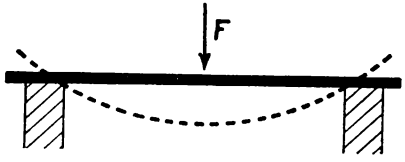


Fig 3 — *Schéma d'une pièce subissant une contrainte de flexion*

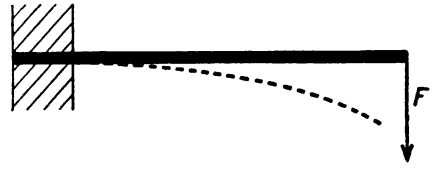


Fig 4 — *Schéma d'une pièce subissant une contrainte de flexion*

B. ÉLASTICITÉ

L'élasticité est la propriété que possèdent certains métaux de reprendre leur forme initiale après avoir subi une déformation.

Ex. : C'est l'élasticité qui permettra aux pièces (fig. 3 et 4) de reprendre leur forme rectiligne après avoir subi une contrainte de flexion.

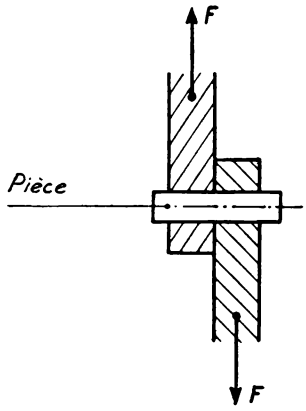


FIG 5 — *Schéma d'une pièce subissant une contrainte de cisaillement.*

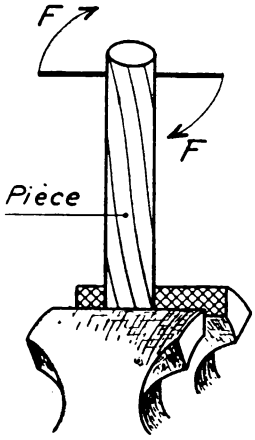


FIG 6 - *Schéma d'une pièce subissant une contrainte de torsion.*

C. DURETÉ

C'est la résistance que les corps opposent à la pénétration d'autres corps.

Cette propriété est recherchée :

— pour les **outils de coupe** (aciers trempés, carbures métalliques) qui doivent tailler le métal à usiner ;

— pour les **pièces frottantes** (arbres, coussinets, dents d'engrenages) dont l'usure provoquerait la mise hors d'usage très rapide ;

— pour les **outils de chocs** (poinçons, bouterolles, marteaux) dont l'écrasement interdirait l'usage.

D. RÉSILIENCE

La résilience est la résistance opposée par un corps aux chocs ou aux efforts brusques (vilebrequins, bielles, outils à matrices...). Au point de vue qualitatif, ou définition, elle s'oppose à la fragilité.

II. — EXEMPLES DE SOLLICITATIONS SIMPLES

Une machine-outil est un ensemble d'organes divers. Chacun de ces organes a une fonction bien déterminée et, de cette fonction, dépend la nature de la sollicitation à laquelle il est soumis.

Nous limitant à la construction mécanique dans laquelle il entre surtout des métaux ou des alliages, nous étudierons succinctement les sollicitations simples auxquelles peuvent être soumis certains organes de machines-outils courantes (1).

(1) Cette étude est élémentaire car les élèves n'ont aucune notion de *force de réaction* et des *conditions d'équilibre d'un système de forces.*

A. CONTRAINTE DE TRACTION

Examinons une scie alternative mécanique (fig. 7).

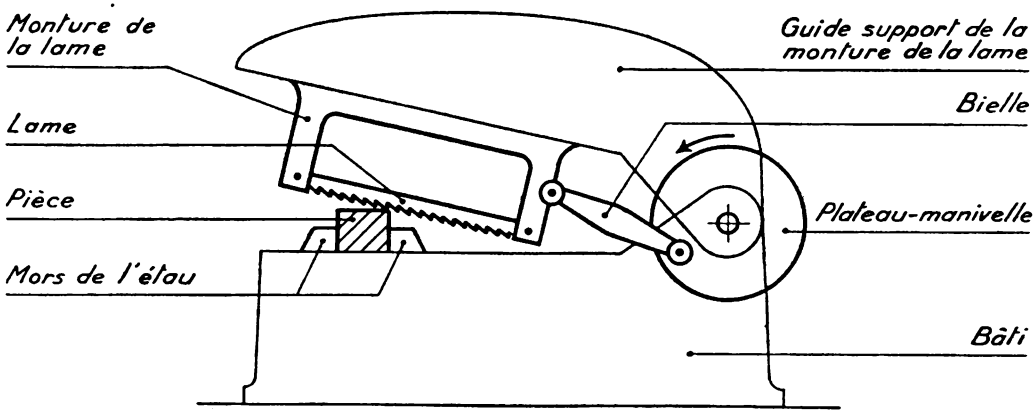


Fig 7 — *Schéma d'une scie alternative mécanique*

Lorsque le bouton-manivelle parcourt l'arc **a b c** (fig. 8), la bielle **tire** la lame avec une force **F** pour lui imprimer son mouvement de coupe $\mathbf{M^t\ C}$.

Mais la pièce oppose une résistance à ce mouvement, **tirant** sur la bielle avec une force **R** dans un sens opposé à celui de **F**.

La bielle subit alors une **contrainte de traction,** ou **extension,** car les deux forces tendent à l'**allonger.**

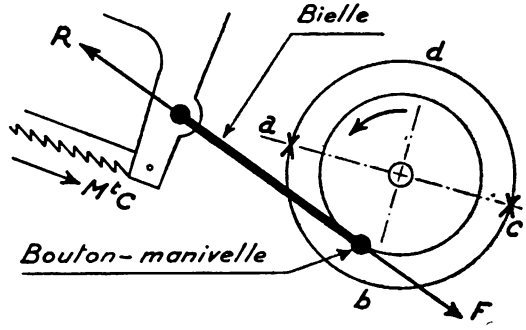


Fig 8 — *La bielle subit une contrainte d'extension*

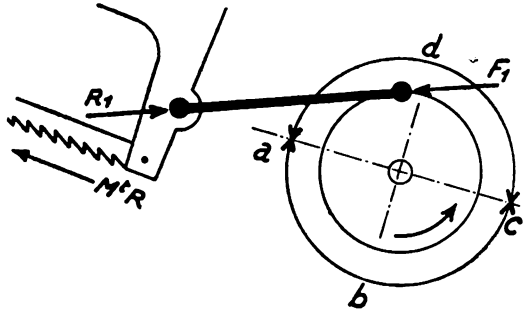


Fig 9 — *La bielle subit une contrainte de compression*

B. CONTRAINTE DE COMPRESSION

Lorsque le bouton-manivelle parcourt l'arc **c d a** (fig. 9) la bielle **pousse** la lame avec une force $\mathbf{F_1}$ pour lui imprimer son mouvement retour $\mathbf{M^t\ R}$.

D'autre part, le frottement de la monture dans sa glissière fait naître la force $\mathbf{R_1}$ qui **pousse** la bielle dans un sens opposé à celui de $\mathbf{F_1}$.

La bielle subit alors un **effort de compression** puisque les deux forces tendent à la **raccourcir.**

C. CONTRAINTE DE FLEXION

Observons un étau-limeur à bielle à balancier (fig. 10).

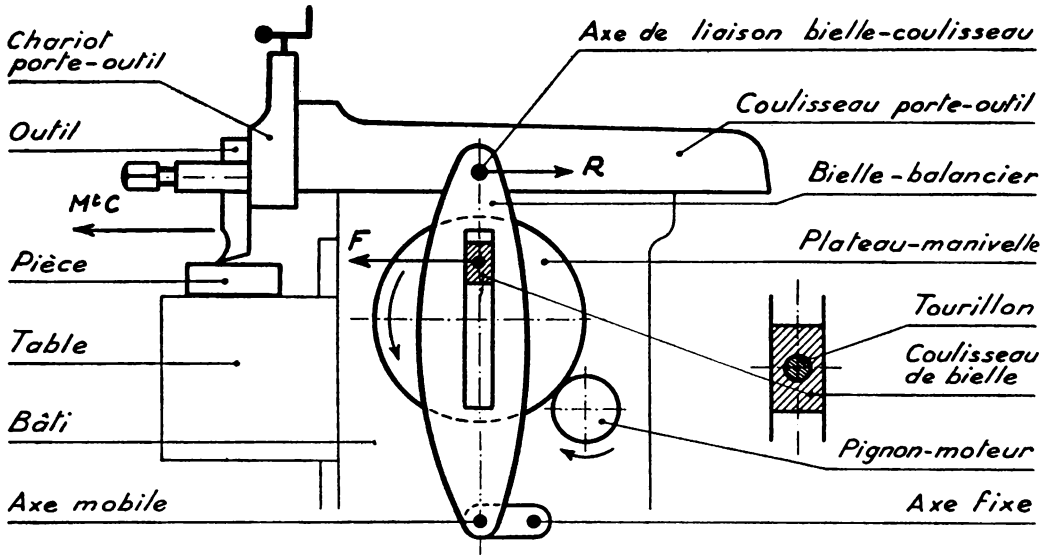


FIG 10 — *Schéma d'un étau-limeur à bielle-balancier*

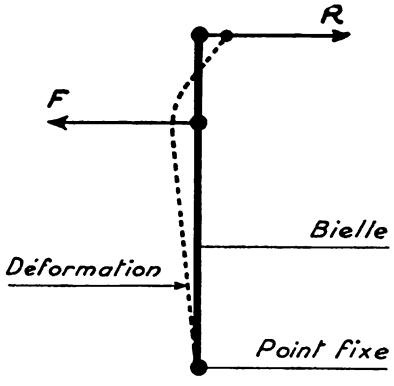


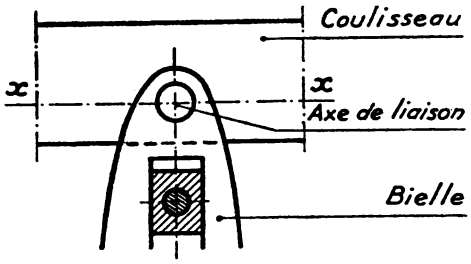
FIG 11 — *La bielle subit une contrainte de flexion*

Le mouvement de coupe de l'outil est provoqué par l'effort **F** exercé sur la bielle par le tourillon du plateau-manivelle.

La résistance du métal à usiner se manifeste par la force **R** qui pousse la bielle, par l'intermédiaire de l'axe de liaison bielle-coulisseau, en sens inverse de **F.**

Sous l'action de ces deux forces, la bielle, dont le pied est fixe, a tendance à **fléchir** (fig. 11). Elle subit une **contrainte de flexion.**

D. CONTRAINTE DE CISAILLEMENT



La bielle imprime le mouvement de coupe à l'outil du fait qu'elle entraîne le coulisseau par l'intermédiaire de l'axe de liaison bielle-coulisseau (fig. 10 et 12).

La force **F** est reportée sur cet axe et la résistance **R**, opposée par le métal, s'y applique aussi, en deux fractions égales $\frac{R}{2}$.

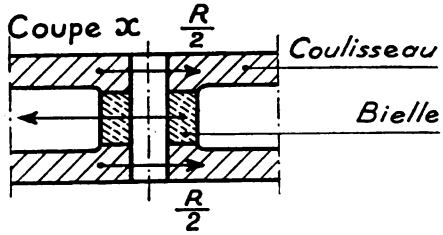


Fig 12 _ L'axe de liaison subit une contrainte de cisaillement

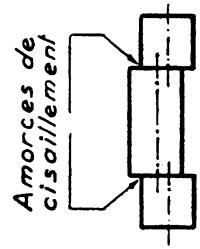


Fig 13 _ Axe partiellement cisaillé

Ces efforts, agissant en sens contraires sur cet axe (fig. 12) tendent à le **cisailler.** Il subit une **contrainte de cisaillement.**

Les effets de cette contrainte peuvent s'observer sur un axe fatigué ou qui a subi des efforts trop élevés (fig. 13).

Les amorces de cisaillement sont nettement visibles.

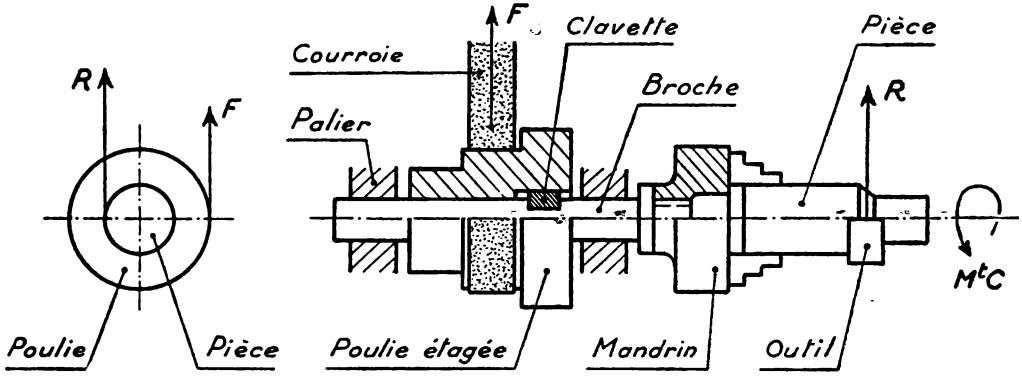


Fig 14 _ Schéma d'une poupée fixe de tour

E. CONTRAINTE DE TORSION

Examinons la broche d'un tour à poulie étagée (fig. 14).

Le brin moteur de la courroie agit tangentiellement à la poulie avec la force **F** qui provoque le mouvement de coupe $\mathbf{M^t}$ **C.**

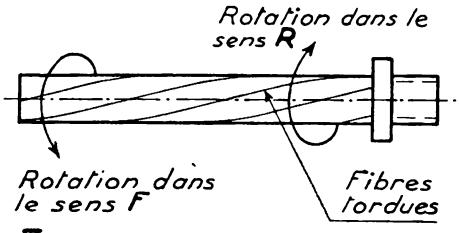


Fig 15 _ *La broche subit une contrainte de torsion*

La résistance du métal à la coupe se manifeste par l'effort **R** qui s'applique sur la broche par l'intermédiaire du mandrin.

Ces deux efforts qui ont tendance à faire tourner la broche en sens contraires la soumettent à une **contrainte de torsion.** Les fibres ont tendance à être **tordues** en forme d'hélice (fig. 15).

Les effets de cette contrainte sont mis en évidence par l'observation d'une entrée de clavette appartenant à un arbre rompu par torsion. Les bords d'une extrémité de la rainure (fig. 16) sont déformés suivant une hélice.

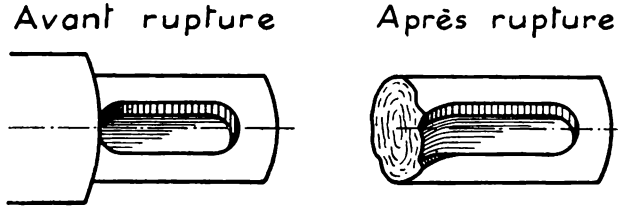


Fig 16 _ *Rupture d'un arbre sous une contrainte de torsion trop élevée*

Résumé

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MÉTAUX

La ténacité **caractérise la résistance à l'extension, à la compression, à la flexion, à la torsion et au cisaillement.**

L'élasticité **marque le caractère passager, non permanent, des déformations.**

La dureté **marque l'opposition à la pénétration, à l'écrasement et à l'usure.**

La résilience **mesure la résistance aux chocs.**

La connaissance exacte de ces propriétés permet au constructeur *d'adapter le métal à la fonction* que l'organe devra remplir, le plus souvent en opposant une propriété caractéristique à une contrainte envisagée avec précision.

ESSAIS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX (Suite)

Les propriétés des métaux ne peuvent se comparer que si elles sont de même nature et que si elles se prêtent à une mesure commode et rapide.

Dire que l'acier est tenace et que la fonte ne l'est pas n'est pas suffisant. Il faut chiffrer le degré de ténacité de l'acier et celui de la fonte et même classer les divers aciers et les diverses fontes car tous sont différemment tenaces.

Cette seule notion de la variabilité de la ténacité montre que le choix du métal résultera toujours d'un compromis entre l'organe trop lourd qui coûtera cher et l'organe trop léger qui ne résistera pas.

Adapter le métal à la fonction exacte de l'organe, c'est donc avant tout chiffrer ses qualités, c'est-à-dire **connaître ses caractéristiques mécaniques.**

Des méthodes expérimentales, rangées sous le nom général d'**essais mécaniques,** permettent de donner aux caractéristiques mécaniques des valeurs numériques qui facilitent la comparaison.

ESSAI DE TRACTION

L'essai de traction, ou **d'extension,** fait connaître principalement les caractéristiques de **ténacité** et **d'élasticité.** Il se pratique sur des **éprouvettes,** échantillons prélevés dans un lot de même métal, et sur des machines provoquant leur allongement.

A. EPROUVETTES

Pour les métaux en barres, l'éprouvette est réalisée au tour. Sa forme et ses dimensions sont données par la figure 17. La partie médiane, rectifiée à un diamètre de 13,85 (section S = 150 *mm*²), porte deux repères distants de 100 *mm*.

Lorsque la longueur **L** et la section **S** ne sont pas conformes aux valeurs courantes, il faut, pour que les résultats soient comparables, appliquer la relation de similitude suivante :

$$L = \sqrt{66{,}67\ S}$$

Par exemple, si S = 75 *mm*² pour un diamètre de 9,77 *mm*, il faudra prendre :

$$L = \sqrt{66{,}67 \times 75} = 71\ mm$$

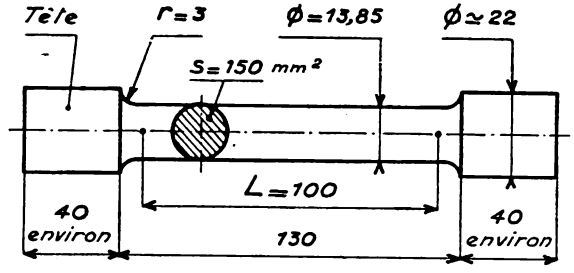


Fig 17 — *Eprouvette normale*

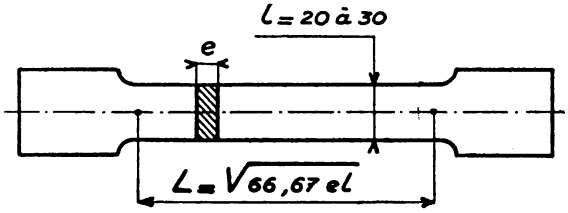


Fig 18 — *Eprouvette plate*

Pour les métaux en feuilles l'éprouvette (fig. 18) a l'épaisseur de la feuille; sa largeur varie de 20 à 30 *mm* et la longueur entre repères est déterminée à l'aide de la relation de similitude $L = \sqrt{66{,}67\ S}$.

Par exemple, si **e** = 2 *mm* et **l** = 30 *mm*, il faudra prendre :

$$L = \sqrt{66{,}67 \times 2 \times 30} = 63{,}5\ mm.$$

B. MACHINES D'ESSAIS DE TRACTION

Qu'elles soient mécaniques ou hydrauliques, verticales ou horizontales, ces machines mesurent l'effort appliqué à l'éprouvette et l'allongement qui en résulte. Le schéma d'une machine verticale hydraulique type Amsler est donné par la figure 19.

L'effort de traction est exercé suivant l'axe de l'éprouvette. Un dynamomètre indique la grandeur de cet effort qu'on peut augmenter progressivement jusqu'à rupture de l'éprouvette. Simultanément, un autre dispositif mesure la valeur de l'allongement subi par l'éprouvette et enfin un appareil enregistreur trace le **diagramme de traction** (fig. 20).

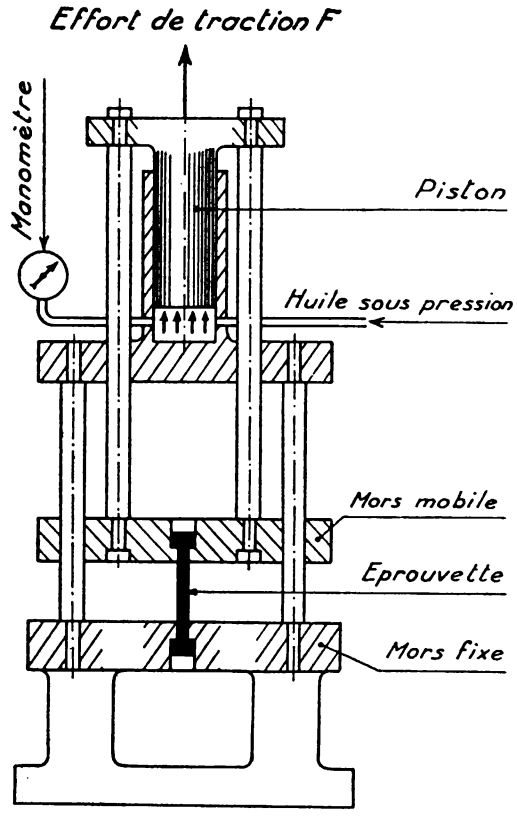


Fig 19 — *Schéma d'une machine verticale d'essai de traction*

Lecture du diagramme. La période **OA**, qui est rectiligne, est celle où les allongements sont proportionnels aux charges. C'est la période des **déformations élastiques**, c'est-à-dire que, au cours de cette période, si l'effort

de traction cesse, l'éprouvette reprend sa longueur initiale. L'effort $\mathbf{F_e}$ **est l'effort de limite élastique** et le point **a** marque la **limite de l'allongement élastique** $\mathbf{l_e}$.

La partie **A B C** correspond à la période où les allongements croissent comparativement plus vite que les charges. C'est la période des **déformations permanentes,** c'est-à-dire que, au cours de cette période, si l'on fait cesser l'effort de traction, l'éprouvette ne reprend plus sa longueur initiale ; elle conserve un allongement plus ou moins grand. D'autre part, elle se ternit et une **striction** (diminution de section) se produit au milieu de sa longueur.

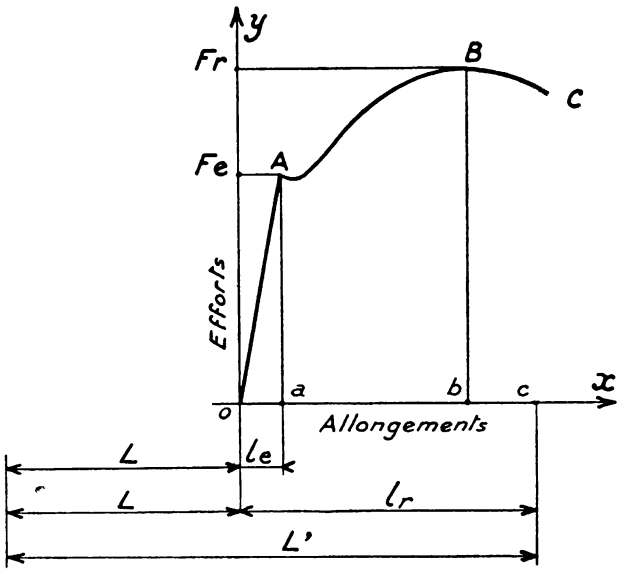


Fig 20 — *Diagramme de l'essai de traction*

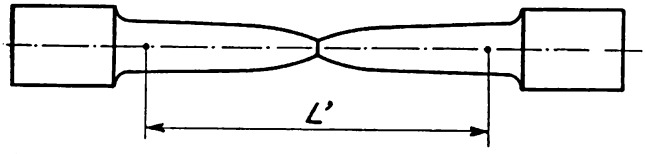


Fig 21 — *Longueur et striction de l'éprouvette après rupture*

A partir de **B** l'allongement augmente de **bc** malgré une diminution de la charge et la striction augmente considérablement jusqu'à rupture de l'éprouvette. L'effort $\mathbf{F_r}$ **est la charge** de rupture. La rupture effective n'a lieu qu'au point **C** et le point **c** limite l'**allongement** total de rupture $\mathbf{l_r}$.

En rapprochant jusqu'au contact les deux morceaux de l'éprouvette (fig. 21), on peut mesurer **L'** et en déduire l'allongement total à la rupture l_r sans passer par le diagramme.

C. CARACTÉRISTIQUES DÉTERMINÉES

On appelle **contrainte,** ou **charge,** ou encore **fatigue,** l'effort appliqué à une section de métal connue et dans un sens bien défini. La contrainte, ou charge, ou fatigue, est dite unitaire quand elle s'applique à l'unité de section choisie, généralement le millimètre carré.

1° Contrainte, ou charge unitaire de limite élastique. C'est le quotient R'_e de l'effort de limite élastique F_e par la section initiale S de l'éprouvette. Elle s'exprime en kilogrammes par millimètre carré.

$$R'_e \; kg/mm^2 = \frac{F_e \; kg}{S \; mm^2}$$

2° Résistance ou charge unitaire à la rupture. C'est le quotient $(R_r)_e$ de la charge de rupture F_r par la section initiale S de l'éprouvette. Elle s'exprime en kilogrammes par millimètre carré.

$$(R_r)_e \; kg/mm^2 = \frac{F_r \; kg}{S \; mm^2}$$

3° Allongement pour cent. C'est l'allongement A correspondant à la rupture de l'éprouvette rapporté à une longueur de 100 *mm*.

$$A\,\% = \frac{L' - L}{L} \times 100$$

4° Module d'élasticité longitudinale. Par définition, le module d'élasticité d'un matériau est le quotient de la contrainte ou charge unitaire de limite élastique R'_e par l'allongement unitaire i correspondant à l'allongement élastique.

Valeur de i : Pour L l'allongement élastique est l_e. Pour 1 *mm*, l'allongement élastique est :

$$i = \frac{l_e}{L}$$

Comme d'autre part $R'_e = \frac{F_e}{S}$, le module d'élasticité E, qui s'exprime en kilogrammes par millimètre carré, est donné par la relation

$$E \; kg/mm^2 = \frac{R'_e}{i} = \frac{\left(\frac{F_e}{S}\right)}{\left(\frac{l_e}{L}\right)} = \frac{F_e \times L}{S \times l_e}$$

de laquelle on tire :

$$l_e = \frac{F_e \times L}{S \times E} = \frac{F_e \times L}{S} \times \frac{1}{E}$$

Cette dernière relation, **valable seulement au cours des déformations élastiques,** montre que l'allongement est :

— directement proportionnel à l'effort de traction et à la longueur totale,

— inversement proportionnel à la section initiale et au module d'élasticité.

D'autre part, la relation montre encore que si les facteurs F_e, L et S restent constants, l'allongement varie en sens inverse du module d'élasticité qui dépend de la nature du matériau.

On peut donc dire que **le module d'élasticité caractérise la résistance d'un matériau à l'allongement.**

Remarques. 1° Le module d'élasticité **E** est sensiblement le même pour tous les aciers et vaut environ 20 000 *kg/mm²*.

2° Les pièces mécaniques ne doivent pas subir une contrainte voisine de la résistance à la rupture pour que la sécurité soit assurée.

La **résistance pratique** à la traction $\mathbf{R_e}$ est obtenue en appliquant à la résistance à la rupture un coefficient de sécurité **K** pouvant varier, suivant le cas, de 3 à 10.

$$\mathbf{R_e}\ kg/mm^2 = \frac{(\mathbf{R_r})_e}{\mathbf{K}}$$

Elle doit toujours rester inférieure à la charge de limite élastique.

D. APPLICATIONS NUMÉRIQUES

Une barre en acier doux de $\varnothing = 20\ mm$ supporte à la traction une charge de 1 250 *kg*. On demande :

1° l'allongement subi par la barre, la longueur soumise à l'effort étant de 3 *m*;

2° la contrainte unitaire subie par la barre;

3° le coefficient de sécurité appliqué, la charge de rupture de cet acier étant de 32 *kg/mm²*.

Solution

1° Section de la barre : $\mathbf{S} = \pi\mathbf{R}^2 = 3{,}14 \times 10^2 = 314\ mm^2$.

Allongement de la barre : $\mathbf{l_e} = \dfrac{\mathbf{F} \times \mathbf{L}}{\mathbf{S} \times \mathbf{E}} = \dfrac{1\,250 \times 3\,000}{314 \times 20\,000} = 0{,}6\ mm$

2° Contrainte unitaire : $\mathbf{R_e} = \dfrac{1\,250}{314} = 4\ kg/mm^2$

3° Coefficient de sécurité : On a $\mathbf{R_e} = \dfrac{(\mathbf{R_r})_e}{\mathbf{K}}$ d'où $\mathbf{K} = \dfrac{(\mathbf{R_r})_e}{\mathbf{R_e}} = \dfrac{32}{4} = 8$

ESSAI DE COMPRESSION

Il y a compression simple lorsque la longueur de la pièce est faible par rapport aux dimensions d'encombrement de la section.

L'essai de compression simple fait subir à l'éprouvette un raccourcissement et un gonflement. Les caractéristiques qu'il révèle sont identiques à celles de l'essai de traction. Il y a exception pour la fonte en particulier qui résiste 4 à 5 fois mieux à la compression qu'à l'extension et dont l'allongement **A** % (élasticité) est très faible.

Résumé

Les caractéristiques mécaniques des métaux sont déterminées expérimentalement.

ESSAI DE TRACTION

L'essai de traction est pratiqué sur des éprouvettes cylindriques ou plates.

Pour que les résultats soient comparables il faut que la longueur et la section des différentes éprouvettes répondent à la relation de similitude

$$L = \sqrt{66{,}67\,S}$$

Les caractéristiques déterminées par l'essai sont : la contrainte ou charge de limite élastique :

$$R'_e \ kg/mm^2 = \frac{F_e \ kg}{S \ mm^2}$$

la charge de rupture :

$$(R_r)_e \ kg/mm^2 = \frac{F_r \ kg}{S \ mm^2}$$

l'allongement pour cent :

$$A\,\% = \frac{L' - L}{L} \times 100$$

le module d'élasticité longitudinale : $E \ kg/mm^2 = \frac{R'_e}{i} = \frac{F_e \times L}{S \times l_e}$ **de laquelle on tire**

$$l_e = \frac{F_e \times L}{S} \times \frac{1}{E}$$

la résistance ou charge pratique R_e **est égale à :**

$$R_e \ kg/mm^2 = \frac{(R_r)_e \ kg/mm^2}{K},$$

K étant un coefficient de sécurité variant de 3 à 10.

ESSAI DE COMPRESSION

L'essai de compression révèle les mêmes caractéristiques que l'essai de traction. Il y a exception pour la fonte qui résiste 4 à 5 fois mieux à la compression qu'à la traction.

ESSAIS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX (Suite)

ESSAI DE DURETÉ

La caractéristique de dureté est mesurée directement sur les barres ou sur les pièces terminées sans passer par l'intermédiaire d'une éprouvette.

I. — ESSAI A LA BILLE DE « BRINELL »

A. PRINCIPE DE L'ESSAI

Sur une bille en acier trempé de 10 *mm* de diamètre, posée sur le métal, on exerce un effort de 3 000 *kg* perpendiculaire à la surface à biller (fig. 22).

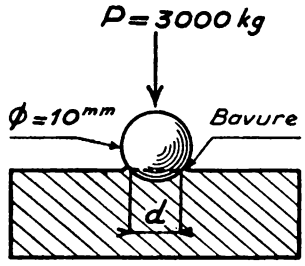


Fig 22 _ *Principe de l'essai de dureté*

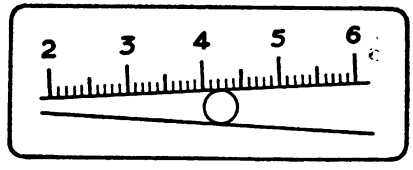


Fig 23 _ *Règle "Le Chatelier" indiquant un diamètre d'empreinte de 4,2 mm*

La bille pénètre dans le métal et laisse une empreinte en forme de calotte sphérique dont le diamètre dans le plan d'affleurement est d'autant plus petit que le métal est plus dur.

Avant essai sur une surface brute, il faut enlever quelques dixièmes de millimètre de métal pour faire disparaître l'oxyde ou les traces d'écrouissage laissées par le laminage en particulier.

Après essai, les bavures provoquées par le billage sont limées et le diamètre est mesuré à l'aide de la règle *Le Chatelier* (fig. 23). Cette règle est constituée par une plaque de verre sur laquelle sont gravées deux droites inclinées dont l'une est graduée pour indiquer les millimètres et les dixièmes de millimètre.

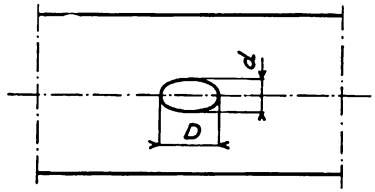


Fig 24 _ Empreinte sur pièce cylindrique

Dans le cas d'un billage opéré sur une partie convexe (fig. 24) le diamètre à considérer est le diamètre moyen

$$\mathbf{d_m = \frac{D + d}{2}}$$

Remarque. La force de 3 000 *kg* n'est appliquée que sur les métaux ferreux.

Afin de réduire le diamètre de l'empreinte on n'exerce qu'une force de 500 *kg* sur le cuivre, l'aluminium et ses alliages, et une force de 1 000 *kg* sur les bronzes.

B. CARACTÉRISTIQUE DE DURETÉ

La dureté d'un métal est définie par un nombre, Δ (1) ou **HB**, appelé nombre de *Brinell.* Ce nombre est égal au rapport de l'effort exercé en *kg* par la surface de la calotte en mm^2.

$$\Delta \text{ ou } \mathbf{HB} = \frac{\mathbf{P}kg}{\mathbf{S}mm^2}$$

C'est un nombre abstrait conventionnel.

$$\text{Si } \mathbf{P} = 3\,000\ kg,\ \mathbf{S} = 15\ mm^2,\ \mathbf{HB} = \frac{3\,000}{15} = 200.$$

C. RELATION LIANT LA DURETÉ A LA CHARGE DE RUPTURE A L'EXTENSION

Les essais ont montré que, pour les aciers,

$$(\mathbf{R_r})_e = \mathbf{HB} \times 0{,}35$$

pour le cuivre, l'aluminium et leurs alliages,

$$(\mathbf{R_r})_e = \mathbf{HB} \times 0{,}5$$

d	HB	(Rr)e	d	HB	(Rr)e	d	HB	(Rr)e
2	946	325	3,5	302	104	5	143	51
2,5	600	207	4	228	79	5 5	116	42
3	418	143	4,5	179	63	6	95	35

Tableau N°1 (pour les aciers) _ Ce tableau n'est qu'un extrait des tableaux usuels qui donnent les diamètres par 1/10 de mm.

Δ : lettre grecque majuscule qui se lit *delta.*

Si, pour un acier, **H B** = 200, on aura : $(R_r)_e = 200 \times 0{,}35 = 70$ *kg/mm²*, ce qui le classe dans le groupe des aciers très durs.

Pour éviter les calculs on utilise des tableaux donnant **H B** et $(R_r)_e$ en fonction du diamètre de l'empreinte (tableau n° 1).

D. MACHINE A BILLER « GUILLERY »

Cette machine (fig. 25) est la plus couramment employée.

La bille, sertie à l'extrémité d'une vis, est mise en contact avec la pièce par la manœuvre d'un volant à friction. La friction a pour but de limiter la pression de la bille.

L'effort de pénétration est donné à l'aide d'un bras de manœuvre calé sur un axe solidaire d'une came qui provoque la rotation d'un levier coudé pouvant pivoter autour d'un couteau. Cet effort est transmis à la pièce et maintenu invariable par l'intermédiaire d'un matelas de rondelles *Belleville*.

Pour éviter l'erreur de lecture qui serait due à l'élasticité du métal à biller il faut, après avoir ramené le bras à sa position de départ, remettre la bille en contact avec la pièce en agissant sur le volant à friction, puis comprimer de nouveau les rondelles. Le diamètre de l'empreinte est ainsi stabilisé.

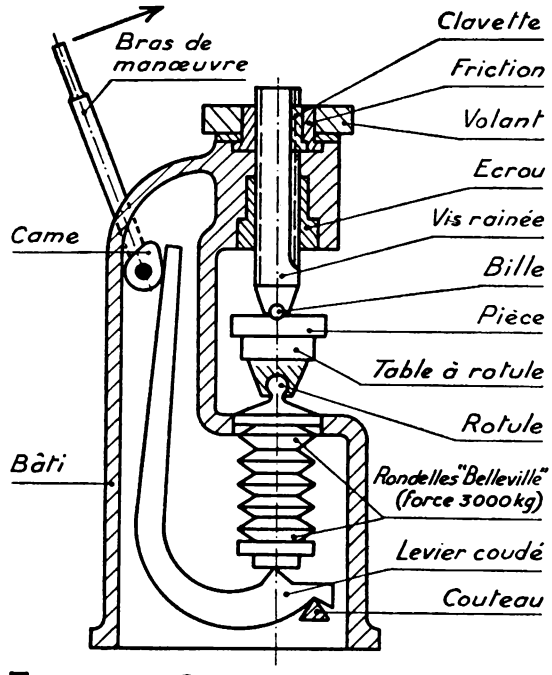


Fig 25 — Schéma de la machine à biller "Guillery"

II. — BILLAGE PAR LA MÉTHODE DE COMPARAISON

A. PRINCIPE

Une bille est intercalée entre un cube étalon **dont on connaît H B et** $(R_r)_e$, et la pièce à biller (fig. 26).

Sous l'action d'un choc provoqué par un coup de marteau, une empreinte se forme dans le cube et dans le métal à essayer.

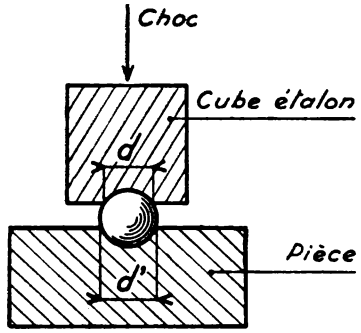


Fig 26 — *Principe du billage par comparaison*

Le diamètre de chaque empreinte permet d'en calculer la surface et on peut poser :

$$HB = \frac{P}{S} \text{ et } H'B = \frac{P'}{S'}$$

L'effort P étant le même pour les deux empreintes on aura :

$$\frac{HB}{H'B} = \frac{\left(\frac{P}{S}\right)}{\left(\frac{P'}{S'}\right)} = \frac{S'}{S} \text{ d'où } H'B = \frac{HB \times S}{S'}$$

B. APPAREIL D'ESSAI

L'appareil d'essai est l'appareil *Turpin* (fig. 27).

Il est livré dans la trousse *Morin* qui comprend **une série de cubes étalons de caractéristiques connues**, une lunette pour mesurer les diamètres d'empreintes avec précision et une règle à calcul circulaire qui donne **H'B** en fonction de **HB, S** et **S'**.

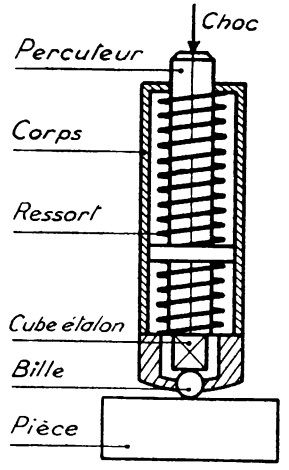


Fig 27 — *Appareil "Turpin"*

III. — ESSAI DE DURETÉ « ROCKWELL »

PRINCIPE

Pour les métaux durs, le corps pénétrant est constitué par un diamant conique taillé à 120° avec pointe légèrement arrondie, fixé à une monture métallique (fig. 28). L'ensemble s'appelle *cône Brasle.*

Pour les métaux tendres on utilise une bille de $\frac{1}{16}$ de pouce, soit 1,58 *mm* de diamètre (fig. 29).

Le degré de dureté *Rockwell* est déterminé par l'enfoncement du corps pénétrant lorsque la force passe de 10 à 150 *kg* pour le cône en diamant (fig. 28) et de 10 à 100 *kg* pour la bille (fig. 29).

L'enfoncement h_2, mesuré en microns, est lu sur un comparateur fixé à la machine. Sa valeur multipliée par un coefficient exprime la dureté *Rockwell.*

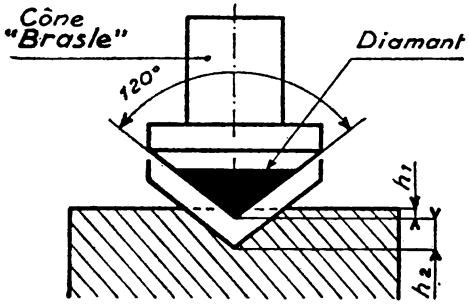


Fig 28 — h_1 : enfoncement pour une force de 10 kg.
h_2 : enfoncement pour une force pouvant varier de 10 à 150 kg.

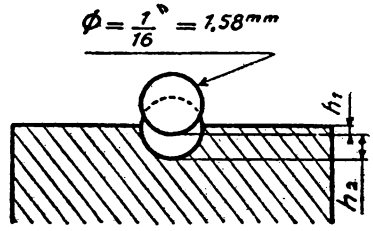


Fig 29 — h_1 : enfoncement pour une force de 10 kg.
h_2 : enfoncement pour une force pouvant varier de 10 à 100 kg.

Mais selon qu'il s'agit de l'essai au cône de diamant ou de l'essai à la bille, la dureté se rapporte à l'échelle **C** (essai au cône) ou à l'échelle **B** (essai à la bille). De plus, la pression pouvant varier, il faut, dans chaque échelle, rechercher la dureté en fonction de la pression (voir tableau n° 2).

Ex. : Dureté *Rockwell* 42-C 60 signifie dureté *Rockwell* 42 au cône de diamant sous pression de 60 *kg*.

Dureté *Rockwell* 73-B 100 signifie dureté *Rockwell* 73 à la bille sous pression de 100 *kg*.

Pour avoir une valeur approchée de la charge de rupture d'un métal ayant subi l'essai *Rockwell*, il faut rechercher la dureté *Brinell* correspondante et appliquer la relation $(R_r)_e = 0{,}35\ HB$. (Voir tableau n° 2.)

IV. — ESSAI DE DURETÉ « VICKERS »

PRINCIPE

Le corps pénétrant est un diamant taillé en forme de pyramide à base carrée dont l'angle au sommet vaut 136° (fig. 30). L'effort de pénétration **P** va de 5 à 125 *kg*.

Au moyen d'une lunette on mesure la diagonale **d** de l'empreinte dans le plan d'affleurement, ce qui permet d'en calculer la surface **S**.

$$S\ mm^2 = \frac{d^2}{2\sin\frac{136^\circ}{2}} = \frac{d^2}{1{,}854}$$

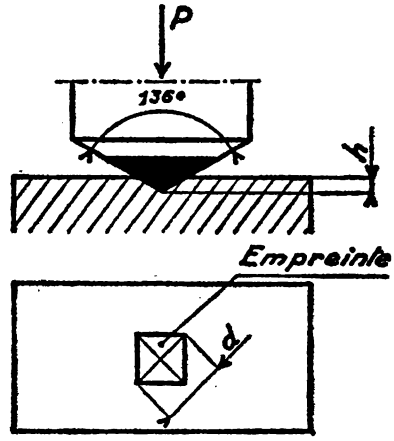


Fig 30 — Principe de l'essai de "Vickers"

La dureté *Vickers* **HV** est exprimée par le rapport :

$$HV = \frac{P}{S} = \frac{P}{\left(\frac{d^2}{1{,}854}\right)} = \frac{1{,}854\,P}{d^2}$$

La valeur approchée de la résistance à la rupture est obtenue en appliquant la relation $(R_r)_e = 0{,}35$ **HB** à la dureté *Brinell* correspondante. (Voir tableau nº 2).

V. — CONDITIONS D'EMPLOI DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ESSAI DE DURETÉ

ESSAI BRINELL

L'essai Brinell laisse des empreintes trop fortes sur les pièces finies, ce qui nuit à leur esthétique.

Il ne permet pas de biller les pièces minces car la bille, sous l'effort de 3 000 *kg* déforme la pièce par flexion et vient s'appuyer sur la table porte-pièce, ce qui fausse le diamètre de l'empreinte. Il en est de même pour les pièces cémentées ou nitrurées dont la couche dure fléchit sous la bille.

Dureté Brinell Bille de 10 mm Charge 3000 kg			Dureté Rockwell				Dureté Vickers
			Echelle C			Echelle B	
d	HB	(Rr)e	Charge 150 kg	Charge 100 kg	Charge 60 kg	Charge 100 kg	HV
2,5	600	207	59	71	81		746
3	418	143	44	59	73		435
3,5	302	104	33	50	67		305
4	228	79	22	42	62	98	226
4,5	179	63		34	56	88	177
5	143	51			50	76	144

Tableau Nº 2 - *Extrait du tableau de correspondance des différents essais de dureté. Le tableau montre que la bille de Rockwell n'est pas employée pour les métaux durs, tandis que le cône Brasle n'est pas utilisé pour les métaux tendres.*

Il ne peut s'appliquer aux aciers trempés car la bille n'a pas une dureté assez grande.

En définitive, l'essai *Brinell* sera surtout employé pour la recherche de la résistance à la rupture des métaux à l'état brut ou semi-ouvrés (laminés).

ESSAIS ROCKWELL ET VICKERS

Les procédés *Rockwell* et *Vickers* s'appliquent aux pièces finies car ils ne laissent que des empreintes presque imperceptibles. Il n'y a pas de restriction pour les métaux durs et les tôles minces.

L'essai est très rapide : 8 secondes environ suffisent alors que l'essai *Brinell* demande approximativement 2 minutes.

Résumé

La caractéristique de dureté est mesurée directement sur les barres ou sur les pièces terminées.

ESSAI A LA BILLE DE BRINELL

Une force P *kg* exercée par une bille en acier trempé, de 10 *mm* de diamètre, sur le métal à essayer détermine dans celui-ci une empreinte en forme de calotte sphérique de surface S mm^2.

On appelle nombre de *Brinell* la valeur

$$\Delta \text{ ou } HB = \frac{P\ kg}{S\ mm^2}$$

La force est adaptée à la nature du métal à essayer.

ESSAI ROCKWELL

Le corps pénétrant est un cône en diamant taillé à 120° avec pointe légèrement arrondie pour l'essai des métaux durs. Pour l'essai des métaux tendres, c'est une bille de $\frac{1}{16}$ de pouce de diamètre.

La caractéristique de dureté est déterminée par la hauteur d'enfoncement du corps pénétrant.

ESSAI VICKERS

Le corps pénétrant est un diamant en forme de pyramide à base carrée.

La dureté *Vickers* HV est exprimée par le rapport

$$HV = \frac{P\ kg}{S\ mm^2} = \frac{1{,}854\,P}{d^2}$$

dans lequel d est la longueur d'une diagonale de l'empreinte.

ÉVALUATION DE LA CHARGE DE RUPTURE

Des tableaux donnent la correspondance entre les duretés *Rockwell*, *Vickers* et *Brinell*. On peut donc obtenir facilement la charge de rupture à l'extension en appliquant un coefficient C au nombre de Brinell.

$$\text{On a } (R_r)_e = HB \times C$$

$C = 0{,}35$ pour les métaux ferreux et $C = 0{,}5$ pour le cuivre, l'aluminium et leurs alliages.

EMPLOI DES DIFFÉRENTS ESSAIS

L'essai *Brinell* laisse de fortes empreintes. Il ne peut être appliqué aux pièces finies ni aux métaux très durs ni aux tôles minces.

Les essais *Rockwell* et *Vickers* s'appliquent dans tous les cas et sont plus rapides que l'essai Brinell.

ESSAIS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX (Suite)

ESSAI DE CHOC

Les organes mécaniques subissent des chocs quand les efforts qui leur sont appliqués varient très brusquement. Cette application instantanée (faible fraction de seconde) de l'effort provoque la rupture locale ou totale de l'organe.

L'essai de choc est pratiqué sur des éprouvettes dont on veut déterminer la **résilience**, c'est-à-dire la résistance aux chocs. Plus un corps est résilient, moins il est fragile.

La violence du choc est caractérisée par l'énergie qui l'a provoqué. Cette énergie **A** se mesure, comme un travail, en kilogrammètres (*kg.m*). Pour un corps qui tombe, l'énergie libérée au point de chute est égale au poids du corps **P** multiplié par la hauteur de chute **H**.

$$\mathbf{A}\ kg.m = \mathbf{P}\ kg \times \mathbf{H}\ m$$

La résilience K d'un matériau est mesurée par l'énergie du choc nécessaire à la rupture d'une éprouvette de 1 cm^2 de section. Elle s'exprime en kilogrammètres par centimètre carré.

$$\mathbf{K}\ kg.m/cm^2 = \frac{\mathbf{A}\ kg.m}{\mathbf{S}\ cm^2}$$

I. — ÉPROUVETTES

1° ÉPROUVETTES NON ENTAILLÉES

Elles sont constituées par des barreaux de section carrée 40 *mm* × 40 *mm* × 250 *mm* réservés à l'essai des fontes et venus généralement de fonderie avec les pièces. Après les avoir détachées elles sont usinées aux cotes précédentes.

2° ÉPROUVETTES ENTAILLÉES

Elles sont prises dans la barre. Leur forme et leurs dimensions sont normalisées (fig. 31).

L'éprouvette reposant sur deux supports distants de 40 *mm*, le choc est donné sur la face opposée à l'entaille.

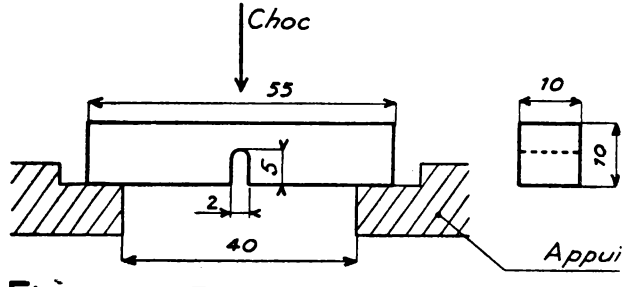


Fig 31 — *Eprouvette entaillée*

II. — MACHINES D'ESSAIS

MOUTON ORDINAIRE

Ce mouton (fig. 32) est uniquement réservé à l'essai des fontes.

Une masse pesante de poids **P** = 12 *kg* comporte une face biseautée terminée par un arrondi. Elle tombe sur l'éprouvette d'une hauteur **H.** L'énergie au moment du choc est égale à **P H.**

En réalité, l'essai comprend une succession de chutes du mouton à partir de hauteurs de plus en plus grandes jusqu'à la rupture. Ce sont les valeurs de ces hauteurs qui caractérisent la résistance de l'éprouvette.

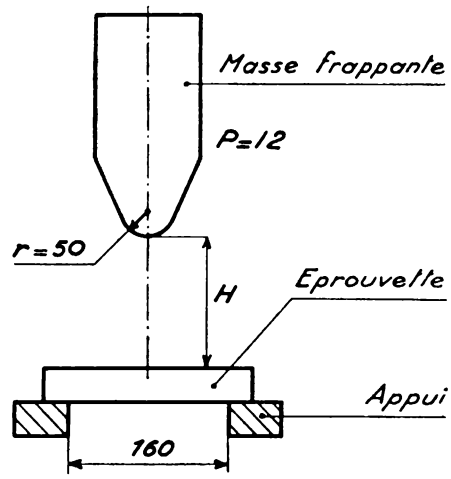


Fig 32 — Schéma du mouton ordinaire

MOUTON PENDULE DE « CHARPY »

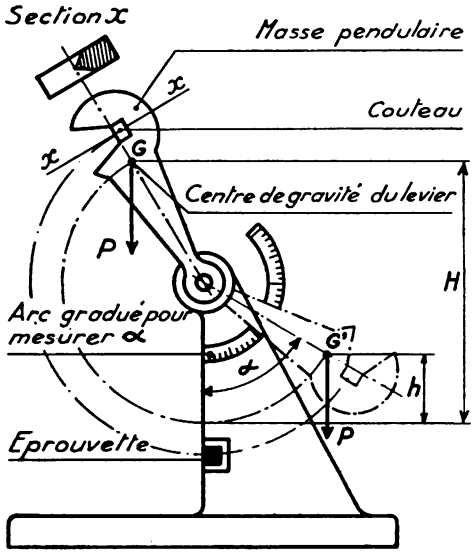


Fig 33 — Schéma du mouton pendulaire de "Charpy".

C'est la machine le plus fréquemment employée (fig. 33).

Une masse pendulaire, présentant un *couteau*, peut osciller autour de son axe. Lorsque la masse tombe de la hauteur fixe **H**, elle vient frapper sur l'éprouvette en développant une énergie **P H** et, après rupture de l'éprouvette, elle remonte à une hauteur **h.**

C'est donc une énergie en excès, ou **énergie résiduelle**, de valeur **Ph**, qui a permis à la masse de remonter.

L'énergie **A** *kg.m* qui a provoqué la rupture de l'éprouvette est donc

$$\mathbf{A}\ kg.m = \mathbf{PH} - \mathbf{Ph} = \mathbf{P\,(H\text{-}h)}$$

et la résilience correspondante est

$$\mathbf{K}\ kg.m/cm^2 = \frac{\mathbf{P\,(H\text{-}h)}\ kg.m}{\mathbf{S}\ cm^2}$$

MOUTON DYNAMOMÉTRIQUE ROTATIF GUILLERY (fig. 34).

Un volant porte un couteau qui, au cours de la rotation, peut sortir radialement et frapper l'éprouvette calée sur le bâti. Un tachymètre indique les vitesses angulaires ω_1 et ω_2 immédiatement avant et après le choc du couteau sur l'éprouvette.

L'énergie cinétique du volant étant $\frac{1}{2}\,\mathbf{I}\,\omega_1^2$ avant le choc et de $\frac{1}{2}\,\mathbf{I}\,\omega_2^2$ après le choc, (1) on en déduit que l'énergie nécessaire à la rupture de l'éprouvette est

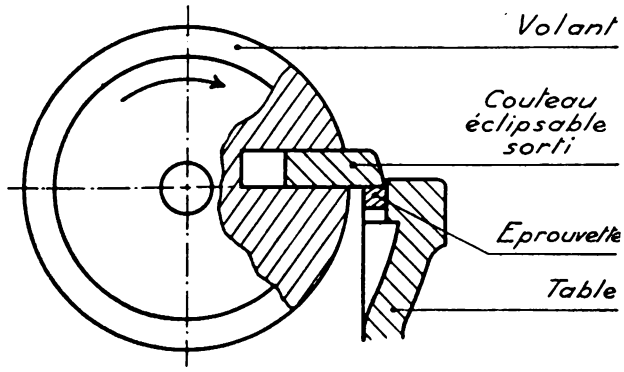


Fig 34 — *Schéma de principe du mouton rotatif*

$$\mathbf{A}\ kg.m = \frac{1}{2}\,\mathbf{I}\,(\omega_1^2 - \omega_2^2)$$ d'où la résilience correspondante

$$\mathbf{K}\ kg.m/cm^2 = \frac{\frac{1}{2}\,\mathbf{I}\,(\omega_1^2 - \omega_2^2)\ kg.m}{\mathbf{S}\ cm^2}$$

Certains moutons rotatifs sont munis d'un tachymètre avec tube manométrique gradué en *kg.m* sur lequel on lit directement l'énergie **A** absorbée par la rupture de l'éprouvette.

Remarque. Pour que les résultats soient comparables il est indispensable de fixer les conditions de l'essai de choc, en particulier les dimensions du barreau et la distance entre appuis.

ESSAIS DE FATIGUE

Les essais précédents sont pratiquement statiques, c'est-à-dire que leur mode opératoire n'impose pas la variation systématique et répétée de l'effort appliqué à l'éprouvette.

Or, les organes mécaniques sont toujours soumis à des efforts variables. Il en résulte que les déformations qui les accompagnent varient sans cesse et que le métal finit par

(1) I est le moment d'inertie de la masse du volant par rapport à son axe de rotation. Sa valeur est connue.

perdre ses qualités d'élasticité et même par céder, bien que ses dimensions soient largement calculées. On dit que la rupture à lieu par **fatigue du métal.**

Il importe donc de connaître la **limite de fatigue pratique** du métal pour laquelle la rupture ne se produira pas.

On la détermine en soumettant les éprouvettes à des efforts variables périodiquement jusqu'à rupture au cours **d'essais dits de fatigue ou d'endurance.**

A. ESSAI DE FLEXION PLANE

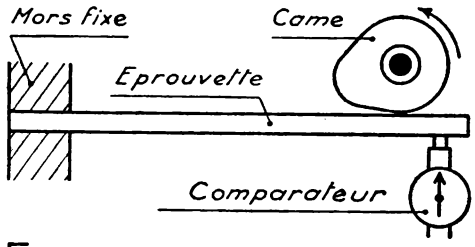


Fig 35 — *Principe de l'essai de flexion plane*

Une éprouvette est encastrée à une extrémité dans le mors fixe de la machine d'essai (fig. 35). Une came, qui agit sur l'extrémité libre, soumet l'éprouvette à des flexions répétées. La flèche prise sous l'effort peut être mesurée facilement par un comparateur.

La valeur de l'effort de flexion, le nombre d'alternances avant rupture, la section de l'éprouvette ainsi que sa dureté et la flèche déterminent après calcul la caractéristique de limite de fatigue dans les conditions d'essai.

B. ESSAI DES EFFORTS AXIAUX

L'éprouvette est de petites dimensions. Elle reçoit des efforts axiaux qui ont pour but de la solliciter alternativement à la compression, ce qui lui impose un flambement (1), et à l'extension, pour la redresser, jusqu'à ce que la rupture se produise.

Dans la figure 36, le mors mobile est attiré alternativement par des électro-aimants dont la force d'attraction est connue.

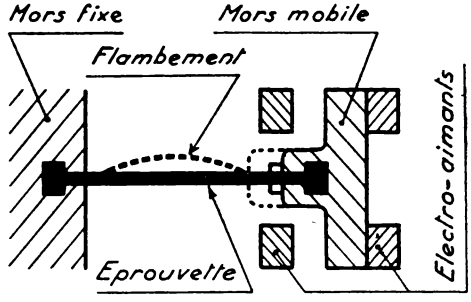


Fig 36 — *Principe de l'essai des efforts axiaux*

C. ESSAI DE TORSION

L'éprouvette est soumise à une torsion alternative par un système bielle et plateau-manivelle à rayon variable (fig. 37).

(1) Le flambement est une compression qui fait fléchir les pièces de grande longueur.

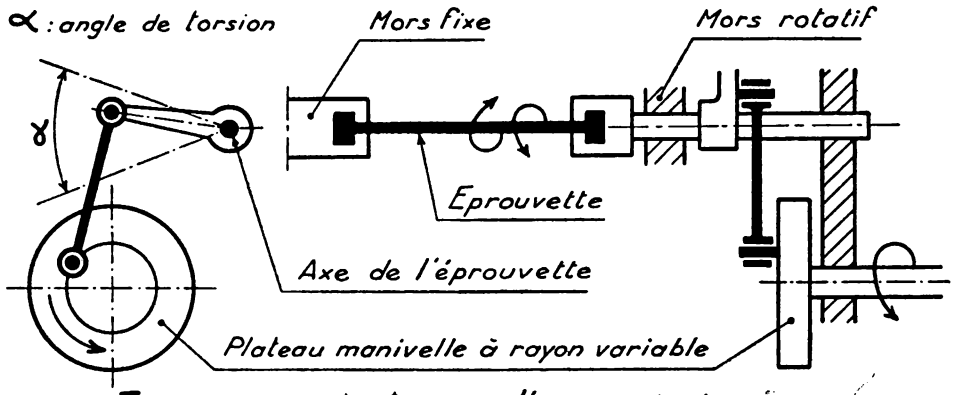


FIG 37 — *Principe de l'essai de torsion*

L'effort de torsion enregistré par un dynamomètre, l'angle de torsion, mesuré optiquement, la section de l'éprouvette et le nombre d'alternances déterminent après calcul la charge limite de fatigue pratique du métal.

D. ESSAI DE FLEXION ROTATIVE

C'est l'essai le plus appliqué parce qu'il est le plus complet (fig. 38).

L'éprouvette, encastrée à une extrémité, est soumise à la flexion par une charge appliquée à son extrémité libre et, en même temps, elle subit un mouvement de rotation à grande vitesse. Les fibres sont donc sollicitées alternativement à l'extension puis à la compression.

L'effort de flexion agit par interposition d'un roulement à billes pour réduire au maximum la torsion de l'éprouvette.

Le moment de flexion, ou **moment fléchissant P × L** et la section de l'éprouvette en particulier déterminent après calcul le taux de contrainte limite.

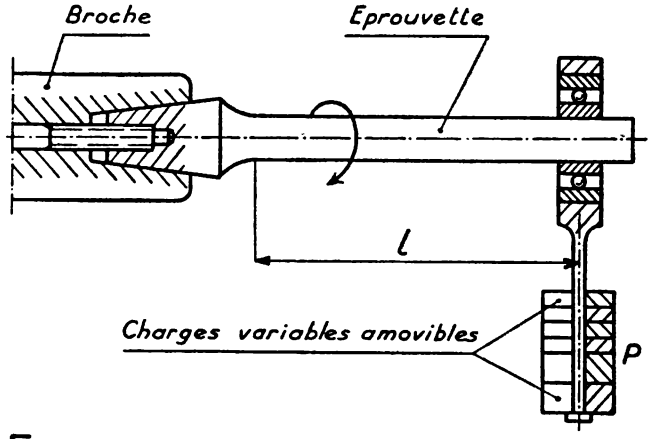


FIG 38 — *Principe de l'essai de flexion rotative*

Résumé

ESSAI DE CHOC

L'essai de choc a pour but de déterminer la caractéristique de résilience

$$\mathbf{K}\ kg.m/cm^2 = \frac{\mathbf{A}\ kg.m}{\mathbf{S}\ cm^2}$$

ESSAI AU MOUTON ORDINAIRE. — Il est pratiqué sur des barreaux en fonte de 40 × 40 × 250.

Cet essai ne permet pas la mesure de la résilience mais seulement le contrôle de la résistance à un choc d'énergie imposée.

ESSAI AU MOUTON PENDULE DE CHARPY. — Cet essai est réalisé sur des barreaux entaillés de 10 × 10 × 55.

L'énergie cinétique qui provoque la rupture de l'éprouvette est

$$\mathbf{A}\ kg.m = \mathbf{P}kg\ (\mathbf{H}—\mathbf{h})\ m$$

La résilience est

$$\mathbf{K}\ kg.m/cm^2 = \frac{\mathbf{A}\ kg.m}{\mathbf{S}\ cm^2}$$

ESSAI AU MOUTON ROTATIF. — Le choc est provoqué par un couteau éclipsable porté par un volant en rotation dont on mesure les vitesses angulaires ω_1 et ω_2 avant et après le choc.

On a donc

$$\mathbf{A}\ kg.m = \frac{1}{2}\mathbf{I}\ (\omega_1^2 - \omega_2^2)$$

$$\text{et } \mathbf{K}\ kg.m/cm^2 = \frac{\mathbf{A}\ kg.m}{\mathbf{S}\ cm^2}$$

L'éprouvette est un barreau entaillé de 10 × 10 × 55.

ESSAI DE FATIGUE

Pour connaître d'une façon précise les aptitudes de résistance d'un métal aux diverses sollicitations qui peuvent lui être imposées, on le soumet à des essais de fatigue dits encore essais d'endurance.

Ces essais consistent à faire subir à une série d'éprouvettes des sollicitations répétées, chacune sous des charges différentes, et jusqu'à rupture. On peut ainsi déterminer le choix d'un métal en fonction des fatigues qu'un organe mécanique devra supporter.

Les principaux essais sont : l'essai de flexion plane, l'essai d'efforts axiaux, l'essai de torsion et enfin l'essai de flexion rotative qui est le plus courant.

ESSAIS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX (Fin)

ESSAIS DE FORGE ET D'EMBOUTISSAGE

Les **essais de forge et d'emboutissage,** appelés encore **essais de travail,** sont adaptés aux diverses applications industrielles des métaux essayés. Ils consistent à imposer aux métaux les mêmes fatigues que celles qu'ils auront à subir lors de leur utilisation en construction. Parmi ces essais on distingue :

I. — ESSAIS DE FORGE

A. ESSAIS DE PLIAGE A FROID

Dans l'ordre de fatigues croissantes imposées au métal, l'échantillon doit pouvoir prendre une des formes ci-après (fig. 39-**a**, **b**, **c**), sans présenter les défauts suivants:

Pailles : défauts de laminage, le métal est mal soudé et présente des décollements.

Fentes: éclatements profonds du métal.

Criques: fentes peu profondes dans le sens transversal.

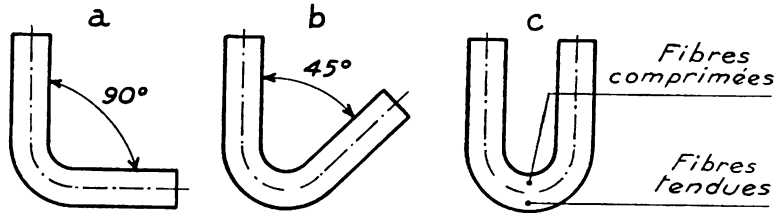


Fig 39 — *Essais de pliage à froid*

Gerçures : petites criques.

Remarquer que les fibres du métal travaillent en compression ou en extension selon qu'elles se trouvent à l'intérieur ou à l'extérieur du pliage.

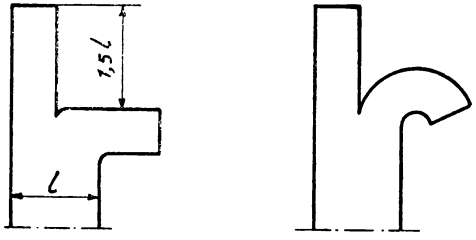


Fig 40_ *Essais de rabattement à chaud*

B. ESSAIS DE PLIAGE A CHAUD

1° Essais de rabattement. Les épreuves se font sur des fers de section rectangulaire dont la largeur égale trois fois l'épaisseur.

La barre est chauffée au blanc et l'extrémité est fendue à la tranche sur une longueur égale à 1,5 fois la largeur de la barre. Une des branches est repliée com-

me l'indiquent les schémas de la figure 40. Le métal ne doit présenter aucun défaut dans la région de pliage.

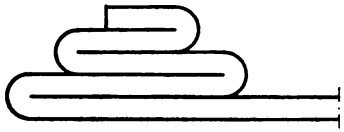


Fig 41 — *Essai de pliages successifs*

2° Essais de pliages successifs. Une barre est chauffée sur une longueur de 400 *mm* de façon telle que l'extrémité soit au blanc et la partie arrière au rouge sombre. On exécute une série de rabattements en commençant par la partie la plus chaude (fig. 41).

Après essai, aucun défaut ne doit être visible.

C. ESSAIS DE PERÇAGE A CHAUD

L'essai se fait en une seule *chaude*, c'est-à-dire que la barre n'est chauffée qu'une seule fois.

L'échantillon, porté au blanc, est percé au poinçon de deux trous disposés dans le sens de la longueur et dont le diamètre est égal à la moitié de la largeur de la barre (fig. 42). L'écartement entre les deux trous est de 15 *mm* environ.

Après essai, aucun défaut ne doit apparaître.

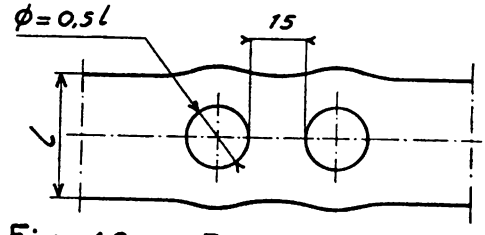


Fig 42 — *Essai de perçage à chaud*

D. ESSAIS DE SOUDABILITÉ

Fig 43 — *Essai de soudabilité*

Deux barres ont chacune une extrémité préparée à la forge suivant une coupe en biais (fig. 43), puis elles sont chauffées au blanc soudant et ensuite martelées rapidement et énergiquement.

La soudure ne doit présenter aucune fissure et, à cet endroit, la barre doit pouvoir supporter des pliages.

ESSAI D'EMBOUTISSAGE

La charge de rupture et la limite élastique déterminées par l'essai de traction sur des éprouvettes plates ne sont pas des caractéristiques suffisantes pour juger les aptitudes d'une tôle à l'emboutissage. En effet, l'effort de traction exercé sur un flan ne se manifeste pas dans les mêmes conditions au cours de l'emboutissage que lors de l'essai de traction.

Il faut donc faire subir aux tôles un **essai d'emboutissage.**

Le principe de l'essai le plus simple et le schéma de la machine employée sont donnés par la figure 44.

Sous la poussée hydraulique du piston, dont la vitesse uniforme est au plus égale à 0,5 *m/mn*, le flan prend une flèche **f** qui va en augmentant (fig. 45). L'essai est arrêté au moment où une crique apparaît et la valeur **f** de la flèche permet de comparer les aptitudes à l'emboutissage.

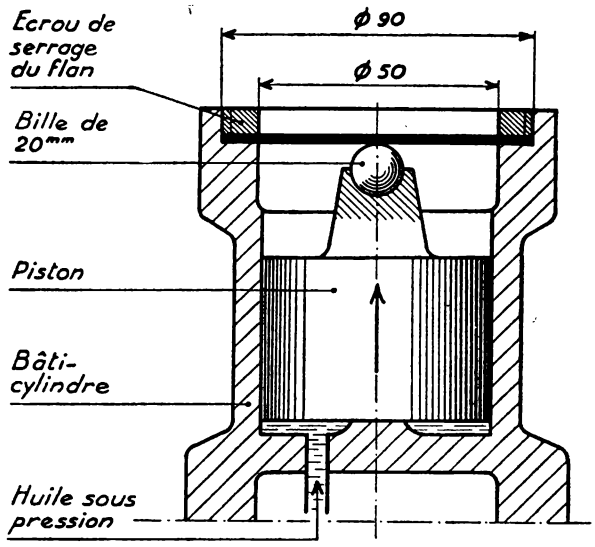


FIG 44_ *Schéma de principe de la machine d'essai d'emboutissage*

Un autre essai plus précis que le précédant consiste à emboutir progressivement un flan poinçonné en son centre au diamètre **d** (fig. 46). Le flan étant fortement pincé sur le bord, il n'y a aucun glissement et le diamètre du trou augmente. Lorsque les premières criques apparaissent sur le pourtour du trou, l'essai est arrêté.

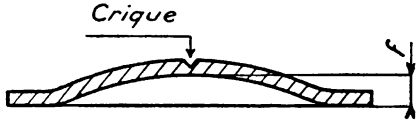


FIG 45_ *Une crique se forme, l'essai est arrêté.*

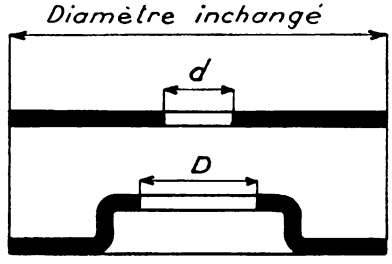


FIG 46_ *Essai d'emboutissage sur flan poinçonné*

La caractéristique d'allongement à l'emboutissage A_e de la tôle est donnée par la relation :

$$A_e\ \% = \frac{D - d}{d} \times 100$$

Les essais physico-chimiques, **micrographie** et **macrographie,** ont pour but de faire connaître la nature, la proportion et l'état des différents constituants des métaux qui influent beaucoup sur leurs propriétés et sont une indication précieuse pour leur utilisation rationnelle.

Le principe des essais physico-chimiques est le suivant : sur le métal, préalablement poli, on verse un réactif (acide chlorhydrique par exemple) puis on observe la surface traitée. Les différents constituants et leur état se distinguent par des taches de couleurs différentes.

A. LA MICROGRAPHIE

La micrographie est l'examen au microscope des métaux polis et attaqués par un réactif. Cet examen permet de différencier les constituants du métal.

Le polissage, qui doit être très poussé, se fait généralement sur un échantillon de petites dimensions et la section examinée est dans un plan perpendiculaire au sens de laminage ou de forgeage.

Un des emplois courants de la micrographie est la recherche ou la vérification des constituants d'un acier qui a subi un traitement thermique.

La figure 47 représente la micrographie d'un acier doux à 1 % de carbone.

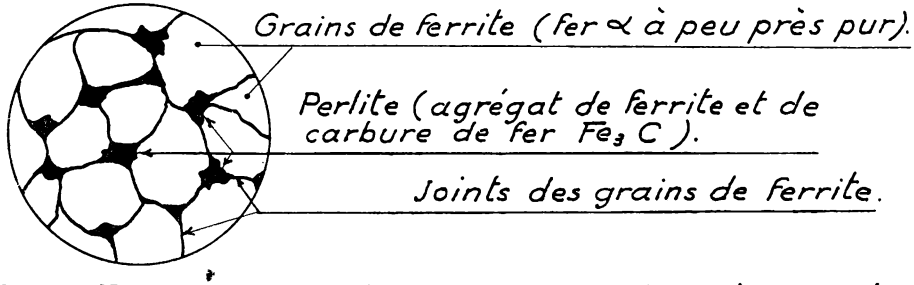


FIG 47_ Micrographie d'un acier doux à 0,1 de C

B. LA MACROGRAPHIE

La macrographie est l'examen à l'œil nu ou à la loupe des métaux polis et attaqués par un réactif. Cet examen a le plus souvent pour but la recherche de l'orientation des fibres métalliques et, par suite, le contrôle du procédé d'obtention d'une forme brute.

Il se pratique sur une assez grande surface de pièce façonnée parallèlement au sens de laminage ou de forgeage.

La figure 48 représente la macrographie d'une bride coudée par forgeage, la figure 49 la macrographie d'une bride découpée dans la masse.

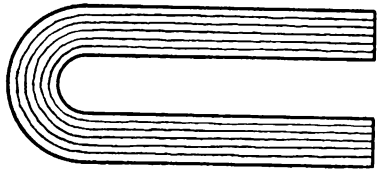


Fig 48 — *Macrographie d'une bride forgée Les fibres ne sont pas coupées (1)*

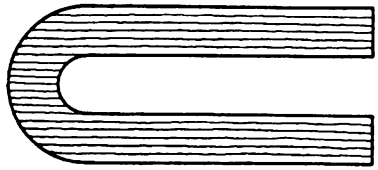


Fig 49 — *Macrographie d'une bride découpée Les fibres sont coupées (1)*

Résumé

ESSAIS DE TRAVAIL

Ces essais tendent à soumettre le métal à des fatigues identiques à celles qu'il supportera lors de son utilisation en construction.

***Essais de forge.* — Les essais de pliage à froid, de pliages et de rabattements à chaud, les essais de perçage à chaud et les essais de soudabilité sont les essais de travail les plus courants pour l'adaptation à la forge.**

***Essais d'emboutissage.* — On le pratique sur les métaux en feuille pour juger leur aptitude à l'emboutissage.**

L'essai sur flan poinçonné donne la caractéristique d'allongement à l'emboutissage.

ESSAIS PHYSICO-CHIMIQUES

La micrographie décèle la nature, la proportion et l'état des constituants, la macrographie indique l'orientation des fibres des métaux.

Les échantillons sont préalablement polis et attaqués par un réactif.

(1) Remarquer que les fibres ne sont ni parfaitement parallèles ni régulièrement espacées. Les schémas (fig. 48 et 49) ne donnent d'ailleurs qu'une idée imparfaite de la disposition de ces fibres.

DEUXIÈME PARTIE

PRINCIPAUX MÉTAUX UTILISÉS EN CONSTRUCTION MÉCANIQUE

Fontes et aciers.

Aluminium et ses alliages.

Magnésium et ses alliages.

Cuivre et ses alliages.

Produits frittés.

PROPRIÉTÉS DES PRINCIPAUX MÉTAUX UTILISÉS EN CONSTRUCTION MÉCANIQUE

Les essais mécaniques nous ont permis de mettre en valeur, pour les métaux courants, des qualités que le constructeur recherche au premier abord pour que l'organe mécanique soit apte à remplir sa fonction. Ce sont la ténacité, la dureté, la résilience, l'élasticité.

Mais la construction de l'organe, sa fabrication, exige d'autres qualités que l'expérience saura mettre à profit au maximum. Nous retiendrons les plus courantes : la fusibilité, la fluidité, la malléabilité, la ductilité et la soudabilité.

Il se trouve que ces qualités, qu'elles soient recherchées pour le premier ou le deuxième but, ne varient pas seulement suivant la nature du métal, acier par exemple, mais aussi suivant les constituants du métal, aciers alliés par exemple, et enfin suivant la proportion des constituants, gamme des aciers au carbone par exemple.

Nous ne pourrons donner qu'un aperçu des qualités des principaux métaux et alliages en signalant toutefois l'influence des constituants principaux sur leur variation.

ALLIAGES FERREUX

On désigne ainsi les **fontes** et les **aciers**, le **fer** étant leur principal constituant.

I. — FONTES

A. FONTES DE PREMIÈRE FUSION

Traité dans le haut-fourneau, le minerai de fer donne un alliage appelé **fonte de première fusion** que l'on classe en trois catégories d'après l'aspect de sa cassure.

1° **Fonte grise.** Sa composition, en poids, est la suivante : fer (Fe) : 93 à 94 % ; Carbone (C) : 3,5 à 4,5 % ; Silicium (Si) : 2,5 % environ.

C'est le **carbone à l'état graphitique** qui donne sa couleur grise à cette fonte et qui la rend **salissante.**

A sa sortie du haut-fourneau, la fonte grise est coulée directement dans le moule pour l'obtention de pièces de grandes dimensions (1) ou sous la forme de **gueuses** (fig. 50) qui sont livrées aux fonderies.

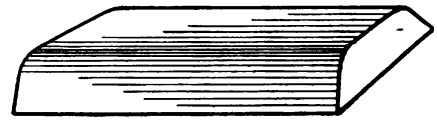


FIG 50 _ *Gueuse de fonte*
Poids : 40 kg environ

(1) Voir ses propriétés mécaniques au paragraphe « **Fontes de 2e fusion** ».

2° Fonte blanche. Elle contient peu de silicium, environ 1 % de manganèse (Mn) et sa teneur en carbone est de 2,5 à 4 %.

Le carbone étant **combiné au fer,** l'alliage est du **carbure de fer,** corps d'un gris très clair avec éclat métallique, d'où son nom de fonte blanche.

C'est une **fonte d'affinage,** c'est-à-dire destinée essentiellement à l'élaboration de l'acier par élimination du carbone en excès.

3° Fonte truitée ou rubanée. C'est une fonte intermédiaire entre les précédentes. Sa cassure présente des parties grises où le graphite domine et des parties claires où le carbure de fer l'emporte.

B. FONTES DE DEUXIÈME FUSION

La fonte de première fusion contient trop d'impuretés pour servir au moulage des pièces mécaniques dont les caractéristiques sont sévèrement imposées.

Pour éliminer ces impuretés, on traite les gueuses dans un **cubilot** et on obtient **la fonte de deuxième fusion.**

1° Fonte mécanique.

C'est une fonte grise riche en carbone : 3,5 à 4,5 % et en silicium : 2 %.

Recueillie dans des poches à la sortie du cubilot, elle est versée dans des moules pour la coulée des pièces mécaniques. Le silicium qu'elle contient lui assure une grande fluidité.

Propriétés mécaniques et physiques. Sa ténacité est faible en raison du graphite qu'elle contient ($R_r)_e$ = 16 à 18 *kg/mm²*, son allongement presque nul A % = 0,5 à 0,7 %, et sa charge de limite élastique est mal définie. La fonte n'est donc employée que pour les organes qui ne subissent aucune contrainte élevée d'extension, de torsion ou de flexion. Mais elle résiste bien à la compression.

On dit qu'elle est *douce* car elle se travaille facilement à l'outil de coupe et sans arrosage parce que le graphite qu'elle contient rend le copeau parcellaire. Il explique aussi la bonne tenue de cette fonte au frottement.

La fonte mécanique étant fragile et non malléable, ne supporte ni forgeage ni laminage.

Son retrait au refroidissement après moulage est d'environ 1 %. Il faut donc prévoir, dans l'établissement des modèles de fonderie, la surépaisseur qui compense ce retrait.

La *croûte* qui enveloppe les pièces coulées, d'une épaisseur de 2 à 4 *mm*, ne possède pas les mêmes caractéristiques que le *cœur* : elle est très dure et très cassante. Elle constitue la surépaisseur laissée normalement pour assurer le façonnage à l'outil.

Formes commerciales et emplois. La fonte grise se vend dans le commerce sous forme :

— de plaques ou de prismes, rondins, galets, appelés **jets,** qu'on peut tronçonner à volonté ;

— de pièces mécaniques ébauchées telles que bâtis, poulies, volants, roues dentées, pièces de formes complexes... ;

— d'articles divers pour chauffage (radiateurs), pour canalisations (robinets), pour installations électriques (boîtes à branchement)...

2° Fonte blanche.

La fonte blanche de deuxième fusion contient de 2,5 à 3,5 % de carbone et peu de silicium : 0,4 à 0,8 %. Cette pauvreté en silicium explique la combinaison du carbone au fer sous forme de carbure de fer et les difficultés de moulage de l'alliage (manque de fluidité).

Propriétés mécaniques et physiques. Elle est très dure et très fragile et ne peut être usinée qu'à la meule ou à l'outil en carbures métalliques.

Son retrait est plus fort que celui de la fonte grise et peut atteindre 1,5 %.

Formes commerciales et emplois. La fonte blanche de deuxième fusion n'est employée que pour des pièces ne devant pas être usinées (tuyaux de canalisation d'eau, de gaz) ou pour des pièces exigeant une grande dureté sans usinage compliqué (cylindres de concasseurs à graines).

C'est la seule fonte utilisée pour l'obtention de la **fonte malléable.**

3° Fonte malléable.

C'est une fonte obtenue par décarburation de la fonte blanche préalablement moulée.

Les pièces coulées en fonte blanche de deuxième fusion sont mises dans des boîtes en fonte (fig. 51) où elles sont enrobées d'oxyde de fer (minerai riche ou battitures de fer).

Les boîtes sont portées dans des fours chauffés à 900° pendant 50 à 90 heures. L'oxygène de l'oxyde de fer provoque la combustion du carbone de la fonte. Après refroidissement lent, les pièces sont malléables par suite de la décarburation de la fonte qui peut atteindre une épaisseur de quelques millimètres. Si elles sont minces, cas le plus fréquent, elles ont les qualités de pièces d'acier doux.

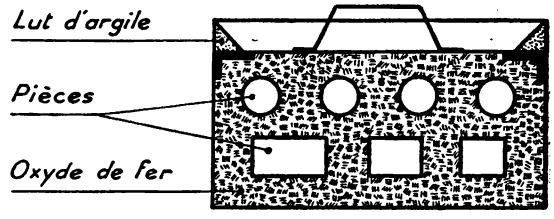


FIG 51 — *Caisse de malléabilisation chargée.*

La fonte malléable a une ténacité qui peut aller jusqu'à 40 *kg/mm²* et son allongement pour cent peut atteindre 15 %.

Formes commerciales et emplois. La fonte malléable est très utilisée pour la fabrication de petites pièces de formes compliquées qui doivent avoir une ténacité, une malléabilité et une résilience comparables à celles de l'acier doux.

Ex. : Raccords et brides de tuyauterie, colliers de serrage, clés de serrures, leviers et petites pièces de mécanique...

4° Fonte trempée.

La fonte grise, quand elle est coulée dans des moules métalliques, présente une dureté superficielle très élevée. En effet, au cours du refroidissement rapide, le carbone se combine au fer sous forme de carbure de fer au lieu de s'isoler en graphite. Il y a trempe.

5° Fontes spéciales.

L'adjonction à la fonte, dans le cubilot même, de certains éléments : acier, chrome, vanadium... donne des fontes spéciales dites **fontes aciérées, fontes au chrome, fontes au vanadium...**

Ces fontes, très résistantes, ont des emplois très particuliers : la fonte aciérée peut servir pour des bâtis de presses, la fonte au chrome pour des bancs de tours, la fonte au vanadium pour des poinçons et matrices de gros outils à emboutir.

Résumé

Les fontes ordinaires sont des alliages dont les principaux constituants sont le fer et le carbone. La teneur en carbone varie de 2,5 à 5 %.

FONTES DE PREMIÈRE FUSION

Ce sont les fontes élaborées dans le haut fourneau. Elles contiennent toujours trop d'impuretés, ce qui oblige, pour leur emploi, à une deuxième fusion dans un cubilot d'où elles sortent purifiées.

FONTES DE DEUXIÈME FUSION

D'après leur teneur en carbone et l'état de leurs constituants, on distingue :

— ***la fonte mécanique :*** **c'est une fonte grise, douce, fragile, non malléable mais qui se moule très bien. Retrait 1 %.**

D'une faible ténacité, $(R_r)_e$ = 16 à 18 *kg/mm²*, elle ne résiste bien qu'à la compression.

La plupart des objets moulés : bâtis, organes de machines-outils, de moteurs, de machines agricoles... sont en fonte mécanique.

— ***la fonte blanche :*** **elle est plus dure, plus fragile et se moule moins bien que la fonte grise. Son usinage ne peut se faire qu'à la meule ou à l'outil carbure.**

La fonte blanche est le plus souvent employée pour des pièces utilisées brutes ou pour l'obtention de la fonte malléable.

— ***la fonte malléable :*** **c'est une fonte blanche de deuxième fusion décarburée dont les propriétés mécaniques sont semblables à celles de l'acier doux.**

On fait en fonte malléable des pièces de petites dimensions et de formes assez compliquées dont le moulage facilite la production.

— ***la fonte trempée :*** **lorsqu'une fonte grise se refroidit rapidement par coulée dans des moules métalliques, la couche superficielle est très dure et la fonte est dite trempée.**

— ***les fontes spéciales :*** **ce sont des fontes grises ordinaires auxquelles on a incorporé, au cours de la fusion, de l'acier, du chrome, du vanadium...**

On obtient alors des fontes mécaniques à haute résistance qui donnent des pièces de qualités bien adaptées à l'emploi.

SEPTIÈME LEÇON

PROPRIÉTÉS DES PRINCIPAUX MÉTAUX UTILISÉS EN CONSTRUCTION MÉCANIQUE (Suite)

LES ACIERS

Sous le nom général d'**acier** on désigne un alliage ferreux dont la teneur en carbone est comprise entre 0,05 et 1,5 %.

On distingue deux grandes classes d'aciers : les **aciers ordinaires** et les **aciers spéciaux.**

ACIERS ORDINAIRES

La plus grande partie des aciers ordinaires, ou **aciers au carbone,** provient de la fonte blanche de première fusion affinée, c'est-à-dire débarrassée partiellement du carbone, du manganèse, du silicium, et totalement du phosphore ou du soufre.

En plus du carbone, les aciers ordinaires contiennent donc du manganèse — 1 % au maximum — et du silicium — moins de 0,5 %.

I. — PRODUITS OBTENUS SELON LE PROCÉDÉ D'ÉLABORATION

A. ACIERS « THOMAS »

La fonte est décarburée dans un convertisseur *Thomas* (1). Le procédé permet de traiter 30 tonnes de fonte en 20 minutes.

B. ACIERS « MARTIN »

La décarburation de la fonte a lieu dans un four *Martin* (1). A la fonte sont ajoutées des ferrailles.

L'élaboration au four *Martin* est plus longue que la précédente mais l'acier obtenu est de meilleure qualité. On peut traiter 300 tonnes toutes les six heures.

C. ACIERS FONDUS AU CREUSET OU AU FOUR ÉLECTRIQUE

Les aciers *Thomas* ou *Martin* sont refondus dans des creusets ou dans des fours électriques.

---

(1) Voir cours de métallurgie, classe de 3e

Les produits, obtenus en petite quantité, sont très purs et prennent le nom d'**aciers fondus au creuset** ou d'**aciers électriques.**

D. ACIERS CORROYÉS

Par cémentation on augmente la teneur en carbone d'un acier *Thomas* ou *Martin* à basse teneur (1).

Après cémentation, les barres recarburées sont chauffées au blanc soudant, cinglées au marteau-pilon, puis laminées, ce qui redonne au métal une homogénéité suffisante. On obtient ainsi **l'acier** dit **corroyé.**

Remarque. Ce classement des aciers au carbone d'après le procédé d'élaboration (voir tableau n° 3) est très vague car il ne peut pas fixer les propriétés de chaque produit avec précision. La teneur en carbone est l'élément qui entraîne le plus de variations.

II. — PROPRIÉTÉS DES ACIERS ORDINAIRES

Les propriétés des aciers ordinaires varient avec leur teneur en carbone.

— La limite élastique, la dureté, la ténacité augmentent avec la teneur en carbone.

— L'allongement pour cent, la malléabilité, la résilience diminuent quand la teneur en carbone augmente.

— La soudabilité est très bonne pour les aciers à faible teneur en carbone, de 0,05 à 0,2 %, puis diminue rapidement au-dessus de ces proportions pour devenir nulle à partir de 0,4 %. Cependant les aciers corroyés et les aciers électriques qui contiennent jusqu'à 0,8 % de carbone ont une bonne soudabilité.

Les aciers au carbone se travaillent bien à l'outil de coupe et se forgent facilement.

Au-dessus de 0,4 % de carbone ils prennent bien **la trempe** et toutes leurs propriétés mécaniques s'en trouvent modifiées (2).

La dureté d'un acier augmentant avec sa teneur en carbone, on peut classer les aciers par ordre de dureté (voir tableau n° 3) mais ce classement est encore imprécis parce qu'il ne tient pas compte de la ténacité, caractéristique la plus déterminante pour la plupart des aciers.

ACIERS SPECIAUX

Un acier spécial est un acier au carbone auquel on a incorporé un ou plusieurs constituants qui lui confèrent des propriétés nouvelles bien adaptées à l'emploi envisagé.

Ces nouveaux constituants sont des **métaux rares,** ou **métaux nobles.**

Les aciers spéciaux se classent en deux catégories : les aciers de construction et les aciers à outils de coupe.

---

(1) Voir la leçon n° 18 sur la cémentation.
(2) Voir la leçon n° 13 sur la trempe.

I. — ACIERS DE CONSTRUCTION

A. ACIERS AU NICKEL

Le nickel augmente la ténacité et la résilience.

En faisant varier la teneur en nickel, on obtient :

1° **Aciers à faible teneur.** Ils contiennent de 1 à 10 % de nickel. Ce sont des aciers pour pièces mécaniques devant supporter de gros efforts (arbres, bielles, pignons).

2° **Aciers à moyenne teneur.** Ces aciers, contenant de 10 à 20 % de nickel, sont très résistants aux chocs et à la traction $(R_r)_e = 140\ kg/mm^2$ mais ils sont très difficiles à travailler à l'outil de coupe. On les emploie pour des plaques de blindage, des tiges tendues...

3° **Aciers à haute teneur.** Ils contiennent de 20 à 46 % de nickel et sont inoxydables.

A 25 % de nickel, les aciers résistent bien à la corrosion, même à haute température. On les emploie pour fabriquer des soupapes de moteurs à explosion et des aubes de turbines à vapeur.

A 32 % ils ont une grande malléabilité et une grande résistance électrique. Ces aciers sont donc employés pour des emboutis profonds et pour la fabrication des rhéostats.

L'acier à 36 % de nickel, appelé **métal Invar,** supporte des variations de températures jusqu'à 350° sans dilatation appréciable. Il est employé dans la fabrication des ressorts d'horlogerie (spiral d'échappement) et des organes d'appareils de mesure de précision.

La **platinite** est un acier à 46 % de nickel dont le coefficient de dilatation est égal à celui du verre. On l'emploie pour la fabrication des lampes électriques.

B. ACIERS AU CHROME

Le chrome augmente la ténacité mais diminue la résilience.

1° **Aciers à faible teneur.** De 1 à 6 % de chrome, les aciers sont très durs et on les emploie pour des pièces ne travaillant pas au choc (Roulements à billes, poinçons et matrices d'outils à emboutir, limes...).

2° **Aciers à haute teneur.** Ces aciers contiennent de 13 à 14 % de chrome. Ils sont inoxydables et entrent dans la fabrication des instruments de mesure, des instruments de chirurgie, de la coutellerie.

C. ACIERS AU NICKEL-CHROME

La combinaison nickel-chrome apporte aux aciers une grande ténacité, une grande dureté et une grande résilience. Ils sont principalement utilisés en mécanique pour des organes supportant de gros efforts ou des chocs (vilebrequins, bielles, pignons...).

Certains sont inoxydables, même non trempés. C'est le cas du « 18-8 » (18 % de chrome, 8 % de nickel) qui est le plus employé, surtout pour la fabrication des appareils alimentaires.

D. ACIERS AU MANGANÈSE

Jusqu'à 8 %, le manganèse rend les aciers inutilisables parce que trop fragiles.

Ceux qui ont une teneur en manganèse de 12 à 21 % sont très résistants aux chocs et à l'usure. Le plus employé est l'acier à 21 % de manganèse connu sous le nom d'acier *Hadfied*. Son usinage est seulement possible à la meule mais il se moule bien. Il est employé brut de moulage pour des essieux de wagons, des mâchoires de broyeurs, des rouleaux de concasseurs, des croisements de voie ferrée, des dents de pelles mécaniques...

E. ACIERS AU SILICIUM

Le silicium augmente surtout l'élasticité.

Les aciers à 1,5 % de silicium sont utilisés pour des ressorts. Ceux à 3 à 4 % ne conservent pas le magnétisme ; on les utilise pour les tôles d'induit de dynamos.

F. ACIERS MANGANO-SILICEUX

Ces aciers sont très utilisés dans l'automobile et les chemins de fer car, après trempe et revenu, ils acquièrent une grande ténacité et une charge de limite élastique élevée. Ce sont donc les meilleurs aciers à ressorts.

G. ACIERS AU TUNGSTÈNE

La principale qualité du tungstène est d'augmenter le pouvoir de trempe des aciers.

Les aciers de construction au tungstène sont les aciers à ressorts qui contiennent 0,6 % de tungstène et les aciers à aimants dont la teneur va de 4 à 6 % ; ils conservent une induction magnétique permanente (aimants permanents).

H. ACIERS AU COBALT

L'acier au cobalt à 5 % possède une grande perméabilité magnétique qui le fait employer pour la fabrication d'aimants.

II. — ACIERS A OUTILS DE COUPE

Les aciers spéciaux à outils de coupe contiennent de 4 à 6 % de chrome et de 14 à 20 % de tungstène pour une teneur en carbone de 0,6 à 0,8 %. L'adjonction d'autres éléments, même en faible proportion, modifie les propriétés de base :

Le vanadium, tout en améliorant la finesse du grain et l'homogénéité, assure une meilleure tenue de coupe à température élevée.

— le molybdène, comme le tungstène, augmente le pouvoir de trempe ;

— le cobalt renforce le pouvoir de trempe apporté par le tungstène et le molybdène.

Ces aciers, après trempe, conservent toute leur dureté jusqu'à une température de 400 à 600°.

Cette propriété justifie l'emploi de ces aciers pour les outils de coupe : ils supportent des vitesses de coupe plus élevées que celles des aciers au carbone. Ils permettent donc une plus grande production (Revoir 16e leçon, cours de la classe de 3e). On les appelle **aciers rapides.**

Résumé

L'acier est un alliage fer-carbone dont la teneur en carbone varie de 0,05 à 1,5 %.

ACIERS ORDINAIRES

L'élément additionnel volontaire est le carbone.

D'après le procédé d'élaboration on distingue les aciers *Thomas*, les aciers *Martin*, les aciers fondus au creuset, les aciers électriques et les aciers corroyés.

Les propriétés d'un acier dépendent surtout de la teneur en carbone :

- **la ténacité, la limite élastique et la dureté augmentent avec la teneur en carbone,**
- **la résilience, l'allongement %, la malléabilité, la soudabilité diminuent quand la teneur en carbone augmente. Cependant les aciers corroyés et les aciers électriques ont une bonne soudabilité jusqu'à 0,8 % de carbone.**
- **à partir de 0,4 % de carbone, les aciers ont la remarquable propriété de bien prendre la trempe.**

ACIERS SPÉCIAUX

L'adjonction d'autres constituants à l'acier ordinaire donne des aciers spéciaux.

Aciers au nickel. **De 1 à 10 % de nickel, ce sont des aciers de construction mécanique.**

De 10 à 20 % ils sont résilients, tenaces, mais difficiles à usiner.

De 20 à 46 % ils sont inoxydables, malléables, et d'une grande résistance électrique.

Aciers au chrome. **A faible teneur (1 à 6 %) ils ont tenaces mais peu résilients. A haute teneur (13 à 14 %) ils sont inoxydables.**

Aciers au nickel-chrome. **Ce sont des aciers très durs, très tenaces, résilients, inoxydables, employés pour des pièces mécaniques de haute qualité.**

Aciers au manganèse. **De 12 à 21 % de manganèse, ils sont très durs, très résistants au choc et à l'usure et se moulent bien.**

Aciers au silicium. **Ces aciers possèdent une grande élasticité.**

Aciers au tungstène. **Ils sont utilisés pour la fabrication des aimants permanents.**

Aciers à coupe rapide. **Ce sont des aciers spéciaux pour outils de coupe. Les éléments d'alliage de base sont le tungstène et le chrome auxquels il est parfois ajouté du vanadium, du molybdène et du cobalt.**

Ces aciers conservent leur dureté jusqu'à 600°, ce qui leur permet de supporter des vitesses de coupe élevées.

PROPRIÉTÉS DES MÉTAUX UTILISÉS EN CONSTRUCTION MÉCANIQUE (Suite)

DÉSIGNATION NORMALISÉE DES ACIERS

De par leur composition chimique, les aciers se classent en deux catégories :

— les **aciers non alliés** ou **aciers au carbone;**

— les **aciers alliés** ou **aciers spéciaux.**

Chaque catégorie comprend :

— des aciers de construction;

— des aciers à outils.

La désignation normalisée permet de retrouver la **nuance** de l'acier, c'est-à-dire sa catégorie chimique, et son classement dans cette catégorie.

Elle suffit donc à la définition des propriétés de l'acier et, par suite, à son adaptation à l'emploi.

I. — ACIERS NON ALLIÉS

Ils ne contiennent aucune addition volontaire d'éléments étrangers dits **éléments d'alliage.** Ce sont les aciers au carbone.

A. ACIERS D'USAGE COURANT SANS CARACTÉRISTIQUES PRÉCISES

Ce sont les aciers ordinaires du commerce, laminés et profilés.

Ils ne font l'objet d'aucun essai à la réception. Seul un essai de pliage peut être imposé.

Il n'y a donc qu'une seule nuance, donc un seul symbole de désignation **A dx** (voir tableau n° 3). Pour cet acier la charge de rupture $(R_r)_e$ peut varier de 33 à 55 *kg/mm²*.

B. ACIERS D'USAGE COURANT A CHARGE DE RUPTURE A LA TRACTION ET ÉVENTUELLEMENT INDICE DE PURETÉ CHIMIQUE IMPOSÉS (1)

Le symbole comprend (voir les exemples) :

— la lettre majuscule **A** (acier),

(1) Se référer aux Normes AFNOR.

— le nombre qui indique la charge de rupture minimum suivi parfois de l'indice d'utilisation principale,

— un nombre indiquant l'indice de qualité,

— éventuellement la lettre **S** impliquant une garantie de soudabilité,

— une lettre minuscule indice de pureté chimique (teneur maximum en soufre et en phosphore (1).

Ex. : A 37 2 d signifie, acier d'usage courant, $(R_r)_e \geqslant 37$ *kg/mm²*, qualité 2, teneur maximum en soufre 0,05 %, teneur maximum en phosphore 0,05 %, total maximum des deux teneurs 0,09 %.

A 42 T 3 S signifie, acier d'usage courant, $(R_r)_e \geqslant 42$ *kg*/mm², utilisation Tôlerie qualité 3, soudable.

C. ACIERS DE QUALITÉ COURANTE POUR TRAITEMENT THERMIQUE

Le symbole comprend :

— la lettre majuscule **C** (carbone),

— un nombre entier égal à 100 fois la teneur % en carbone,

— éventuellement la lettre **S** impliquant une garantie de soudabilité,

— une lettre minuscule indice de pureté chimique.

Ex. : C 35 e signifie, acier à 0,35 % de carbone, teneur maximum en soufre 0,04 %, teneur maximum en phosphore 0,04 %, total maximum des deux teneurs 0,07 %.

D. ACIERS FINS A CARACTÉRISTIQUES SERRÉES POUR TRAITEMENT THERMIQUE

La désignation est la même que pour la catégorie précédente mais la lettre **C** est précédée de la lettre **X.**

Ex.: XC 10 f. (acier de cémentation).

II. — ACIERS ALLIÉS

Ce sont les aciers spéciaux.

A. ACIERS FAIBLEMENT ALLIÉS

Dans cette classe d'aciers, aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5 %.

La désignation comprend :

— un nombre entier égal à 100 fois la teneur en carbone ;

— une lettre ou une série de lettres symbolisant les principaux éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes ;

(1) Se référer aux Normes AFNOR.

Classement des aciers

D'après le procédé d'élaboration	D'après l'échelle de dureté				D'après la désignation normalisée (exemples)	Emplois
	Désignation	Teneur en C %	(Rr)e en kg/mm²	Soudabilité		
Aciers Thomas	Extra-doux	0,05 à 0,2	35 à 45	Bonne	A dx	Profilés pour charpente métallique, serrurerie.
					C 10 d	Très malléable, chaudronnerie, tubes, fils.
Aciers Martin	Doux	0,2 à 0,3	45 à 55	Difficile	A 33 A 37 T 3s	Visserie, tôles de construction, mécanique courante.
Aciers corroyés	Demi-durs	0,3 à 0,6	55 à 65	Bonne pour les aciers corroyés et électriques, nulle pour les aciers fondus.	C 35 e C 50 s	Bonne mécanique, taillanderie, outils agricoles, coutellerie ordinaire.
Aciers fondus	Durs	0,6 à 0,8	65 à 75		C 80 s XC 80 F	Coutellerie fine, outils de coupe ou de choc à main, pièces de grande dureté, acier Stub.
Aciers électriques	Extra-durs	0,8 à 1,5	75 à 100		XC 100	
					30 CN D8 Z 15 CN 18	Aciers spéciaux de construction, à outils de coupe (aciers rapides) et à outils de choc.

Tableau N° 3 _ *Exemple de tableau comparatif des aciers.*

— un nombre indiquant la teneur de l'élément d'addition contenu dans la plus forte proportion, cette teneur étant multipliée par 4 pour le chrome, le manganèse, le nickel, le silicium et par 10 pour le molybdène, le tungstène, le vanadium...

Ex. : 30 CND 8 désigne un acier spécial contenant 0,3 % de carbone, 2 % de chrome, du nickel et du molybdène. La teneur en ces deux derniers métaux est donnée dans des tableaux de composition.

B. ACIERS FORTEMENT ALLIÉS

Ces aciers contiennent au moins un des éléments d'addition dans une teneur $\geqslant$ à 5 %. La désignation diffère de la précédente par les points suivants :

— elle est précédée de la lettre **Z,**

— le nombre qui suit le groupe de lettres représente la teneur en pour cent de l'élément d'addition contenu dans la plus forte proportion.

Ex. : Z 15 CN 18 signifie acier spécial qui contient 0,15 % de carbone, 18 % de chrome et du nickel. C'est un acier inoxydable.

Nota. — Des tableaux, des formulaires, des catalogues donnent les équivalences des désignations normalisées et des désignations commerciales des producteurs ainsi que les emplois courants.

FORMES MARCHANDES DES ACIERS

Les aciers sont livrés dans le commerce sous des formes répondant aux conditions d'emploi imposées par la construction mécanique ou métallique.

Ces formes sont obtenues par laminage, étirage et tréfilage.

I. — PRODUITS LAMINÉS

Ils se divisent en produits semi-finis et en produits finis.

A. PRODUITS SEMI-FINIS

Ces produits comprennent les **blooms,** les **billettes,** les **brames** et les **largets,** à section carrée ou rectangulaire avec angles arrondis (fig. 52 et 53).

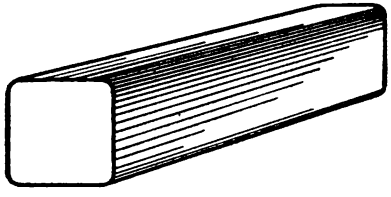


Fig 52 _ *Bloom : poids ≃ 4500 kg*
Billette : poids ≃ 850 kg

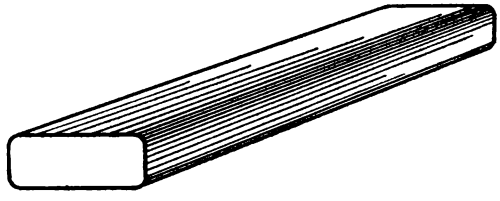


Fig 53 _ *Brame : poids ≃ 250 kg*
Larget : poids ≃ 100 kg

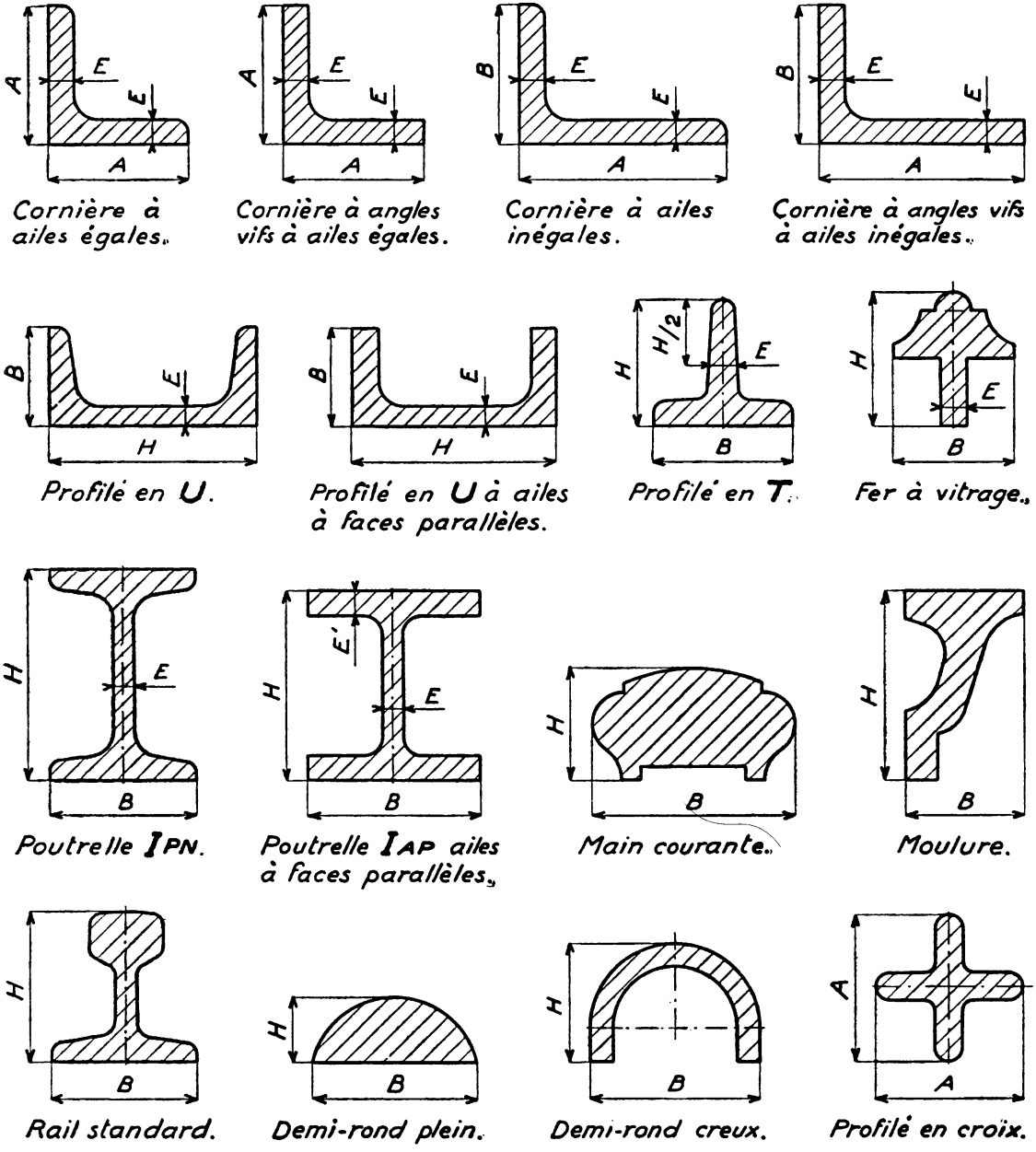


FIG 54 - *Profilés par laminage. Les profilés à ailes à faces parallèles et à angles vifs sont à employer de préférence aux profilés à ailes avec dépouille*

Ils sont obtenus par laminage du lingot après sa coulée et constituent la matière première pour les produits finis.

B. PRODUITS FINIS

Dans cette catégorie sont classés :

1° ***les barres*** à section ronde, carrée ou rectangulaire. Longueur courante : 6 *m*. Sur commande, il peut être livré des barres de 8 *m*, 10 *m* et 12 *m* ;

2° ***les profilés pour charpente métallique*** (fig. 54) parmi lesquels on distingue les cornières, les profilés en **U**, en **T** et en **I** : longueur courante 6 *m*. Certains profils sont à angles arrondis, d'autres à angles vifs ; ces derniers sont à utiliser de préférence ;

3° ***les profilés pour menuiserie métallique*** (fig. 54) qui comprennent les fers à vitrage, les moulures, les mains courantes ;

4° ***les profilés pour serrurerie*** (fig. 54) : demi-ronds pleins, demi-ronds creux, fer en croix ; longueur courante 6 *m* ;

5° ***les rails***, longueur 12 *m*, 18 *m* ou 24 *m* (fig. 54) ;

6° ***les tôles :*** les **tôles noires** sont livrées oxydées, telles qu'elles sortent du laminage à chaud,

les **tôles décapées** ont subi un simple ou double décapage à l'eau acidulée,

les **tôles blanches polies** sont des tôles décapées et repassées à froid au laminoir,

les **tôles bleues** utilisées pour les calibres sont des tôles d'acier dur recuites en atmosphère réductrice, puis durcies par laminage à froid,

le **fer blanc** est de la tôle mince étamée,

les **tôles ondulées** sont des tôles galvanisées employées pour les toitures,

les **tôles striées** portent des nervures en losange. Elles sont de forte épaisseur ($e \geqslant 5$ *mm* nervure comprise) et destinées à l'exécution de planchers métalliques.

Les tôles sont désignées par leur état et leurs dimensions : épaisseur en millimètres ou en dixièmes de millimètre, longueur et largeur en mètres. Les tôles les plus courantes ont 1 *m* × 2 *m*.

7° ***les tubes roulés et soudés*** par rapprochement à la soudure électrique continue, utilisés pour les conduites d'eau, de gaz ou de vapeur à faible pression. On les appelle *tubes à gaz* et leurs dimensions sont données en pouces.

8° ***les tubes laminés*** sans soudure destinés aux conduites de fluides à moyenne et haute pression.

On les désigne par leur diamètre extérieur et leur épaisseur.

II. — PRODUITS ÉTIRÉS ET TRÉFILÉS

Ce sont des produits finis à l'aspect net et lisse et de dimensions respectées à moins de 0,1 *mm* près.

Ils sont obtenus à froid en faisant passer dans une **filière** en carbure de tungstène des barres laminées, décapées et suiffées. On obtient ainsi des barres de section cylindrique, carrée, rectangulaire, hexagonale ou quelconque ainsi que des tubes.

Les produits étirés sont toujours livrés en barres droites.

Par **tréfilage** on entend fabrication de **fils.** Les produits tréfilés sont enroulés sur des bobines à leur sortie de la filière.

L'acier Stub est un acier dur étiré puis rectifié sur des machines à rectifier sans centre. La précision est garantie à quelques centièmes de millimètre près.

La **corde à piano** est un fil d'acier dur au carbone, livré écroui et quelquefois trempé et rectifié.

Les fils sont livrés soit tels qu'ils sortent du tréfilage sous le nom de **fils clairs,** soit étamés, soit galvanisés.

Résumé

On classe les aciers en :

— **aciers non alliés ou aciers au carbone,**

— **aciers alliés ou aciers spéciaux.**

ACIERS NON ALLIÉS

Selon leur désignation on distingue :

— **les aciers d'usage courant sans spécification.**
Symbole : Adx.

— **les aciers d'usage courant à charge de rupture minimum et indice de pureté chimique imposés.**

Symbole type : A 42 T 3 S qui signifie A = acier, 42 = $(R_r)_e$ en *kg/mm²*, **T = utilisation pour tôle, 3 = qualité, S = garantie de soudabilité.**

— **les aciers de qualité courante pour traitement thermique. Symbole type : C 45 e qui signifie C = acier au carbone, 45 = 0,45 % de carbone, e = indice de pureté chimique.**

— **les aciers fins à caractéristiques serrées pour traitement thermique qui ont même symbole que les précédents, la lettre C étant précédée de la lettre X :**

Ex. : XC 80 f.

ACIERS ALLIÉS

Ils sont faiblement alliés lorsque la teneur en chacun des éléments d'addition n'atteint pas 5 %.

Ex. : 30 CND 8 dans lequel 30 = 0,3 % de carbone, C = chrome, N = nickel, D = molybdène, 8 = 4 fois la teneur en chrome, donc 2 % de chrome.

Pour les aciers fortement alliés, la désignation ci-dessus est précédée de la lettre Z. Symbole type Z 15 CN 18 8 signifie : Z = acier fortement allié, 15 = 0,15 % de carbone, C = chrome, N = nickel, 18 = 18 % de chrome, 8 = 8 % de nickel.

FORMES MARCHANDES DES ACIERS

Les aciers sont livrés dans le commerce sous forme de :

- **Produits semi-finis laminés : blooms, billettes, brames, largets.**
- **Produits finis laminés : barres, profilés pour charpente métallique, pour menuiserie métallique, pour serrurerie, rails, tubes, tôles.**
- **Produits finis étirés : barres, tubes.**
- **Produits finis tréfilés : fils.**

NEUVIÈME LEÇON

PROPRIÉTÉS DES PRINCIPAUX MÉTAUX UTILISÉS EN CONSTRUCTION MÉCANIQUE (Suite)

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

L'aluminium appartient à la catégorie des **métaux légers.**

Il est tiré de la bauxite rouge qui, traitée dans une solution de soude, donne, après calcination, **l'alumine** ou oxyde d'aluminium. L'électrolyse de l'alumine libère l'aluminium.

PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM

L'aluminium est un métal blanc, très bon conducteur de la chaleur et de l'électricité. Point de fusion : 650°. Sa faible densité — 2,7 — le classe dans les métaux légers.

Ténacité. Elle varie selon l'état mécanique du métal. Etat recuit : $(R_r)_e$ = 7 à 10 *kg/mm²*; état écroui : $(R_r)_e$ = 15 à 18 *kg/mm²*.

Ductilité et malléabilité. Ces propriétés sont très accusées car il est possible d'obtenir des fils de 0,05 *mm* de diamètre et des feuilles de moins de 0,05 *mm* d'épaisseur.

Dureté. Elle est faible : **H B** = 15 à 20.

En raison de sa faible ténacité et de sa faible dureté, l'industrie mécanique n'emploie l'aluminium que sous forme d'alliages.

ALLIAGES D'ALUMINIUM

Les alliages d'aluminium sont des alliages légers. Ils se divisent en deux grandes catégories : les alliages de forge et de laminage et les alliages de fonderie.

Chacune de ces catégories se subdivise en alliages sans traitement thermique et en alliages avec traitement thermique.

Le traitement thermique comprend une trempe à l'eau après chauffage à 500-550° Un revenu à 100-200° pendant plusieurs heures suit parfois la trempe.

I. — ALLIAGES DE FORGE ET DE LAMINAGE

A. SANS TRAITEMENT THERMIQUE

Duralinox. Composition : aluminium (Al) 96,5-94,5 ou 92,5 %, magnésium (Mg) 3-5 ou 7 %, manganèse (Mn) 0,5 %. La teneur en magnésium classe l'alliage en duralinox H3, duralinox H5 ou duralinox H7.

Sa ténacité est fonction de la teneur en magnésium $(R_r)_e$ = 20 à 45 *kg/mm²*.

Le duralinox a un grand allongement — 22 % en moyenne — d'où son emploi pour la chaudronnerie.

B. AVEC TRAITEMENT THERMIQUE

1° **Duralumin.** Composition : Al 95 %, cuivre (Cu) 4 %, Mg 0,5 %, Mn 0,5 %.

La ténacité et l'allongement % dépendent de l'état du métal. Pour le **duralumin normal,** obtenu par laminage à chaud suivi de trempe, $(R_r)_e$ = 40 à 45 *kg/mm²*, **A** % = 16 à 24 %. Pour le **duralumin dur,** qui est un duralumin normal repassé à froid au laminoir $(R_r)_e$ = 45 à 55 *kg/mm²* et **A** % = 3 à 10 %.

En raison de sa bonne ténacité, le duralumin est un des alliages d'aluminium le plus appliqué en construction mécanique (automobile, aviation, chemins de fer).

2° **Almélec.** Composition : Al 98,5 %, Mn 0,7 %, silicium (Si) 0,5 %, fer (Fe) 0,3 % — $(R_r)_e$ = 35 *kg/mm²*.

Il se substitue au cuivre pour les lignes de transport de l'énergie électrique.

3° **Almasilium.** Il contient : 97 à 98,5 % d'Al, 0,5 à 1 % de Mg, 1 à 2 % de Si.

Sa ténacité varie avec l'état du métal $(R_r)_e$ = 22 *kg/mm²* pour l'almasilium normal et 45 *kg/mm²*, pour l'almasilium dur. L'allongement % de l'almasilium normal est de 22 %, d'où son emploi pour les emboutis profonds.

II. — ALLIAGES DE FONDERIE

A. SANS TRAITEMENT THERMIQUE

1° **Alliages au cuivre.** Composition : Al 88 à 92 %, Cu 8 à 12 %. — $(R_r)_e$ = 14 à 24 *kg/mm²*. Faible résistance à la corrosion.

Ces alliages sont employés pour les moulages peu compliqués : carters, socles, boîtes à vitesses.

2° **Alpax.** Composition : Al 87 à 88 %, Si 12 à 13 %. $(R_r)_e$ = 17 à 20 *kg/mm²*.

Sa grande fluidité, sa bonne ténacité en font le métal par excellence pour les moulages compliqués sans risque de criques (carters de moteurs et pièces de grandes dimensions sous faibles épaisseurs). Il résiste bien à la corrosion.

3° **Alliages hypersiliciés.** Al 76 %, Si 22 %, Cu 2 %. $(R_r)_e$ = 17 à 19 *kg/mm²*.

Ces alliages ont un faible coefficient de dilatation, ce qui justifie leur emploi pour pistons de moteurs à explosion.

B. AVEC TRAITEMENT THERMIQUE COMPLET

1° **Alliage Y.** Al 92,5 %, Cu 4 %, Mn 1,5 %, nickel (Ni) 2 %. $(R_r)_e$ = 25 *kg/mm²*

Alliage pour pistons et culasses de moteurs et autres organes devant travailler à haute température.

2° **Alpax gamma.** Al 87,25 %, Si 12 %, Mn 0,5 %, Mg 0,25 %. $(R_r)_e$ = 22 à 30 *kg/mm²*.

Alliage facile à couler et de bonne ténacité destiné au moulage de pièces mécaniques de haute qualité.

III. — TRAVAIL MÉCANIQUE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

A. USINAGE

Tous les alliages d'aluminium se travaillent facilement à l'outil de coupe, mais il faut un arrosage abondant pour empêcher la formation du **copeau adhérent** (fig. 55) qui provoquerait un mauvais état de surface. L'huile soluble donne satisfaction.

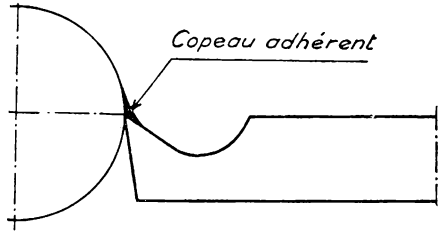


FIG 55 — *Copeau adhérent*

Les outils doivent avoir un angle de pente effective de coupe de 40° et une dépouille de 6°.

La vitesse de coupe peut atteindre 600 *m/mn* avec des outils en carbures métalliques.

Sur les fraises, un entredents de grand volume favorise l'évacuation des copeaux.

Le perçage est réalisé à l'aide de forets dont la taille est inclinée de 40° sur l'axe et dont l'angle de pointe vaut 140°.

Le sciage peut se faire à l'aide de scies à ruban à bois à la vitesse de coupe de 800 à 1 500 *m/mn*.

Le limage à la **lime écouenne** (lime à une taille) est recommandé car les limes à deux tailles s'encrassent facilement et les grains ramassés par la lime causent l'arrachement du métal limé.

B. MOULAGE

L'alliage est fondu dans des fours à creuset et coulé dans des moules en sable ou métalliques. Ces derniers sont chauffés avant la coulée du métal.

C. FORGEAGE

Le forgeage et l'estampage sont faciles à condition de rester dans des limites de température étroites : 375 à 425°.

D. EMBOUTISSAGE ET CHAUDRONNAGE

L'aluminium et ses alliages de forge se chaudronnent facilement. Cependant des recuits sont nécessaires pour supprimer les effets de l'écrouissage.

Les alliages avec traitement thermique sont chaudronnés immédiatement après trempe ou après recuit au four.

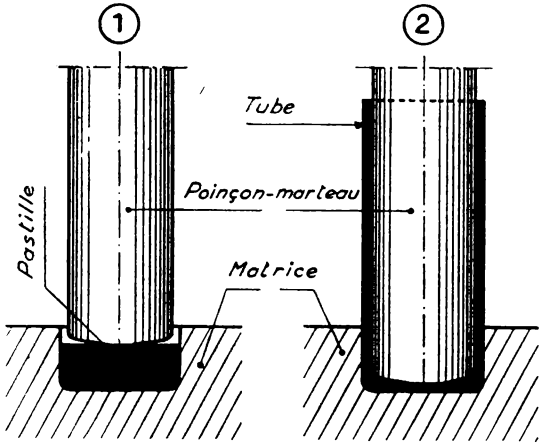


Fig 56 — *Principe du filage de l'aluminium*

E. FILAGE

L'aluminium se **file** facilement et donne des tubes très minces (tubes d'aspirine par exemple).

Le principe du filage est le suivant (fig. 56). Dans une matrice est logée une pastille d'aluminium (fig. 56-1) dont l'épaisseur est fonction de la hauteur et de l'épaisseur du tube à obtenir. Un poinçon-marteau cylindrique frappe violemment la pastille, ce qui a pour effet de l'échauffer et d'augmenter sa malléabilité. Le métal est alors obligé de remonter le long du poinçon (fig. 56-2). L'épaisseur du tube est donnée par l'espace annulaire qui existe entre poinçon et matrice.

F. SOUDAGE

Le soudage oxyacétylénique, le soudage à l'arc et par résistance sont applicables aux alliages d'aluminium. Les baguettes de métal d'apport sont de même nature que les pièces. Un flux décapant est nécessaire afin de maintenir les parties à souder en état de propreté.

LE MAGNÉSIUM ET SES ALLIAGES

Le **magnésium** est obtenu par électrolyse d'un minerai appelé **dolomie** (chlorure de magnésium).

PROPRIÉTÉS DU MAGNÉSIUM

C'est un métal blanc, de densité très faible — 1,7. — Porté à son point de fusion — 650° — il peut s'enflammer et brûler s'il est finement divisé.

Le magnésium est peu malléable, peu ductile. En raison de sa faible ténacité — $(R_r)_e$ = 16 *kg/mm²* — l'industrie mécanique ne l'utilise qu'en alliages, dits **alliages ultra-légers,** qui se classent comme les alliages d'aluminium.

Les principaux sont :

I. — ALLIAGES DE FORGE ET DE LAMINAGE

AVEC TRAITEMENT THERMIQUE

1° **Alliage M1.** Mg 92,5 %, Al 6 %, zinc (Zn) 1 %, Mn 0,25 %, Si 0,25 %. $(R_r)_e$ = 28 à 35 *kg/mm²*. Utilisé pour la fabrication des profilés et des tubes.

2° Alliage M2. Mg 91,5 %, Al 7 %, Zn 1 %, Mn 0,25 %, Si 0,25 %. $(R_r)_e$ = 32 à 36 *kg/mm²*. Utilisé pour pièces forgées à haute résistance (hélices), cet alliage peut aussi être filé.

II. — ALLIAGES DE FONDERIE

A. SANS TRAITEMENT THERMIQUE

1° Alliage F3. Mg 95,55 %, Al 3 %, Zn 1 %, Mn 0,25 %, Si 0,2 %. $(R_r)_e$ = 16 à 29 *kg/mm²*. Se moule principalement au sable pour pièces de grandes dimensions (carters).

2° Alliage F41. Mg 94,55 %, Al 4 %, Zn 1 %, Mn 0,25 %, Si 0,2 %. $(R_r)_e$ = 18 à 28 *kg/mm²*. Employé surtout pour le moulage en coquille de petites pièces.

B. AVEC TRAITEMENT THERMIQUE

Alliage F.T. Mg 90,65 %, Al 8,3 %, Zn 0,5 %, Mn 0,35 %, Si 0,2 %. $(R_r)_e$ = 23 à 31 *kg/mm²*. Utilisé pour moulage au sable de pièces de haute qualité.

III. — TRAVAIL MÉCANIQUE DES ALLIAGES DE MAGNÉSIUM

A. USINAGE

L'usinage des alliages de magnésium est très facile et se fait à sec. Il n'y a pas risque d'inflammation car le copeau n'est pas assez finement divisé.

La vitesse de coupe peut être égale ou supérieure à celle de l'usinage des alliages d'aluminium. Les angles caractéristiques des outils ont les mêmes valeurs que pour le travail de l'acier doux.

B. CHAUDRONNAGE

Les alliages de chaudronnage ne se travaillent bien que si on les maintient à une température d'environ 300°, ceci en raison de leur faible allongement : $A\ \% = 8$ à 10 %.

C. SOUDAGE

Ces alliages ont une bonne soudabilité et le soudage oxyacétylénique est facile ; il y a lieu d'employer un flux décapant pour dissoudre les oxydes.

Les risques d'inflammation existent mais ils sont très réduits.

DÉSIGNATION NORMALISÉE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM ET DE MAGNÉSIUM (1)

Ces alliages sont désignés par :

— une lettre majuscule qui symbolise le métal de base (A : aluminium, G : magnésium) ;
— éventuellement un chiffre indice de la pureté chimique ;

(1) D'après les normes AFNOR

— un tiret;

— un groupe de lettres majuscules qui symbolisent les éléments additionnels rangés dans l'ordre de grandeur décroissante;

— des chiffres qui représentent la teneur en % de ces éléments et qui suivent immédiatement la lettre symbole de ces éléments.

Ex. A 3 : C'est de l'aluminium à 98 %.

A-U 4 G : alliage d'aluminium à 4 % de cuivre et d'une teneur en magnésium plus petite que 1 % mais non déterminée; c'est un duralumin.

G-A 3 Z 1 : alliage de magnésium à 3 % d'aluminium et 1 % de zinc. C'est un alliage F 3.

Nota. Des tableaux de correspondance sont nécessaires pour déterminer l'équivalence entre les désignations commerciales des différents alliages.

FORMES MARCHANDES

L'aluminium se vend dans le commerce sous forme de lingots de 1 à 15 *kg*, de billettes rondes ou carrées de 10 à 40 *kg*, de feuilles, de profilés et de tubes.

Les alliages légers et ultra-légers sont vendus sous forme de feuilles, de profilés divers, de fils, de tubes et de pièces moulées.

Résumé

L'aluminium et le magnésium sont des métaux peu employés en construction mécanique en raison de leur ténacité et de leur dureté trop faibles.

Leurs alliages, par contre, y entrent pour une bonne part, surtout dans les constructions où le poids mort doit être réduit. Ils se classent en :

— alliages de forge et de laminage,

— alliages de fonderie.

Chacune de ces catégories comprend des alliages utilisés sans traitement thermique, d'autres après traitement thermique.

TRAVAIL MÉCANIQUE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

L'usinage se fait à grande vitesse de coupe (jusqu'à 600 *m/mn*) sous lubrification avec des outils dont l'angle de pente effective de coupe vaut 40°.

Le moulage est réalisé en sable ou en coquille.

Le forgeage est délicat car les températures limites de forgeage sont très rapprochées : 375 à 425°.

Le chaudronnage est aisé mais des recuits sont nécessaires en cours d'opération.

Le filage permet l'obtention de pièces très minces.

Le soudage oxyacétylénique, le soudage à l'arc ou le soudage par résistance sont également applicables. Pour les deux premiers un flux décapant est nécessaire.

TRAVAIL MÉCANIQUE DES ALLIAGES DE MAGNÉSIUM

L'usinage exige des outils identiques à ceux utilisés pour l'acier doux. Il est réalisé à très grande vitesse de coupe et sans lubrification.

Le chaudronnage n'est possible que si le métal est travaillé à une température voisine de 300°.

Le soudage oxyacétylénique est facile; un flux décapant est indispensable.

PROPRIÉTÉS DES PRINCIPAUX MÉTAUX UTILISÉS EN CONSTRUCTION MÉCANIQUE (Fin)

LE CUIVRE ET SES ALLIAGES

Le **cuivre** provient :

— de la fusion de paillettes de cuivre, ou **cuivre natif,** suivie d'un affinage électrolytique ;

— de minerais dont les plus répandus sont les pyrites cuivreuses. Les pyrites (sulfure de cuivre) donnent par *grillage*, puis par fusion, un produit brut qui est ensuite affiné par électrolyse.

PROPRIÉTÉS DU CUIVRE

Le cuivre est un métal de couleur rouge. Densité 8,9. Point de fusion 1 050°. C'est le métal usuel qui conduit le mieux la chaleur et l'électricité.

Ténacité. La ténacité varie suivant l'état mécanique du métal : écroui $(R_r)_e$ = 30 *kg/mm²*, recuit $(R_r)_e = 20$ *kg/mm²*.

Malléabilité et ductilité. Le cuivre est très malléable et très ductile ; il peut donner des fils de quelques centièmes de millimètre de diamètre.

Allongement %. Il est de 65 % pour le cuivre recuit, ce qui lui confère sa grande malléabilité.

Emploi. Métal peu tenace, tendre, le cuivre n'entre dans la construction mécanique que sous forme d'alliages. Par contre il est très utilisé dans la construction électrique en raison de sa bonne conductibilité électrique.

ALLIAGES DE CUIVRE

I. — LES BRONZES

L'élément d'alliage principal est l'étain. D'autres éléments d'addition (zinc, manganèse, nickel, aluminium), peuvent y être ajoutés.

A. BRONZES MÉCANIQUES

1° Bronzes ordinaires. Cuivre (Cu) 85 à 90 %, Etain (Sn) 10 à 15 %. Dureté *Brinell* $\simeq$ 125. Leur principale qualité est la dureté qui est fonction de la teneur en étain.

Ils sont utilisés pour la robinetterie, les raccords de tuyauterie...

2° Bronzes mécaniques spéciaux. En plus de l'étain on ajoute :

— **du phosphore** (Ph) 0,1 à 0,3 % qui augmente la dureté de l'alliage — **HB** $\simeq$ 150 — et, par suite, la résistance à l'usure par frottement. Les bronzes pour coussinets, roues dentées, écrous de commande des chariots de machines-outils, sont des bronzes phosphoreux ;

— **du fer** (Fe) $\leqslant$ 2 % lorsque l'on veut obtenir des bronzes très tenaces : $(R_r)_e \simeq 35\ kg/mm^2$;

— **du zinc** (Zn) 2 à 4 % afin d'augmenter la fusibilité ;

— **du manganèse** (Mn) $\leqslant$ 5 % en vue d'augmenter l'allongement % ;

— **du nickel** afin de conserver à l'alliage sa dureté à chaud (sièges de soupapes) ;

— **du silicium** (Si) $\leqslant$ 2 % pour rendre l'alliage plus ductile.

B. BRONZES SPÉCIAUX

1° Bronzes d'art. Cu 84 %, Sn 8 %, Zn 8 %. La grande teneur en zinc facilite la coulée des sujets.

2° Bronzes de cloches. Cu 75 à 80 %, Sn 20 à 25 %. Ces bronzes sont durs et fragiles. Chauffés à 550° et refroidis dans l'eau, ils deviennent plus facilement usinables.

3° Bronzes d'aluminium. Ces alliages ne contiennent pas d'étain mais 5 à 15 % d'aluminium et un peu de fer, de silicium et de manganèse.

Ils sont ductiles, malléables — **A** % $\simeq$ 35 % — forgeables à 550°, inoxydables. Comme ils résistent bien à la corrosion par l'eau de mer, ils sont utilisés dans la construction navale (hélices, pompes...).

II. — LES LAITONS

Les laitons sont des alliages de cuivre et de zinc. La teneur maximum en zinc est de 40 %.

A. LAITONS DE DÉCOLLETAGE

Cu 60 %, Zn 40 %. Ce sont des laitons *secs* appelés aussi laitons de 2e catégorie. $(R_r)_e = 40\ kg/mm^2$. Leur couleur est jaune rosée. Pour rendre le travail à l'outil de coupe plus facile on ajoute 1 % de plomb à l'alliage.

On les emploie pour la robinetterie et la visserie, surtout pour la visserie électrique et pour les pièces de contacts électriques.

B. LAITONS D'EMBOUTISSAGE

Cu 70 %, Zn 30 %. Ces laitons, dits de 1re catégorie, ont un allongement de 68 % à l'état recuit. Leur couleur est jaune verdâtre. Ils sont malléables et ductiles.

Employés pour des emboutis profonds, ils doivent subir des recuits après chaque passe.

C. MÉTAL DELTA

C'est un laiton spécial contenant : Cu 55 %, du zinc, 3 à 4 % de fer et du manganèse jusqu'à 10 %.

Ce métal est tenace $(R_r)_e$ = 40 à 60 *kg/mm²*, forgeable, et se moule bien. Sa résistance à la corrosion par l'eau de mer et ses bonnes propriétés mécaniques le font utiliser pour des pièces de construction navale.

III. — MAILLECHORT

Le maillechort 1er titre, le plus utilisé, contient : Cu 60 %, Zn 20 %, Ni 20 %. C'est un alliage ductile, malléable et inoxydable.

Il est employé :

— pour la construction des rhéostats en raison de sa résistivité ;

— pour la fabrication de vaisselle, de compas, d'instruments de mesure, de pièces décoratives, car il est inoxydable et susceptible de prendre un beau poli.

IV. — TRAVAIL MÉCANIQUE DU CUIVRE ET DE SES ALLIAGES

A. USINAGE

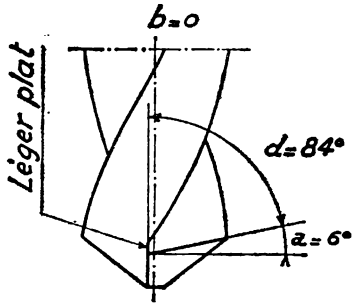


Fig 57 — *Foret hélicoïdal "mouché" pour le perçage du bronze et du laiton.*

1° Du cuivre. Angle de pente effective de coupe des outils : 40°. Vitesse de coupe : jusqu'à 80 *m/mn* pour les outils en acier rapide. Lubrification à l'huile soluble.

Limage à la lime écouenne.

2° Des bronzes, des laitons et du maillechort. Angle de pente effective de coupe 0° ce qui nécessite des forets à cannelures droites. Pour l'emploi des forets hélicoïdaux, il faut *moucher* l'arête coupante à la pierre à huile de façon à déterminer un léger plat sur l'arête coupante (fig. 57).

Vitesse de coupe 80 *m/mn* avec outils en **A. R** sans lubrification.

Limage à la lime deux tailles. **Les limes utilisées ne doivent jamais travailler des aciers.**

B. MOULAGE

Le cuivre se moule difficilement, les soufflures étant pratiquement inévitables, mais les alliages de cuivre se moulent bien.

C. FORGEAGE

Le cuivre se forge à 600°. Parmi les alliages, seul le bronze d'aluminium est forgeable ainsi que les laitons et le maillechort.

D. SOUDAGE

Le soudage oxyacétylénique s'applique aux cuivres, bronzes et laitons, mais il est délicat et demande une connaissance approfondie de la technique opératoire particulière à chaque métal.

Le maillechort se soude parfaitement et facilement en utilisant un métal d'apport identique aux pièces à souder et un flux décapant.

V. — FORMES MARCHANDES

Le cuivre, les laitons, le maillechort sont livrés dans le commerce sous forme de **planches** (feuilles), de fils, de barres, de profilés, de tubes.

Le bronze est livré en barres rondes coulées, pleines ou creuses, sous le nom de **jets pleins** ou de **jets creux,** de longueurs variables, ainsi qu'en objets coulés.

VI. — DÉSIGNATION NORMALISÉE

Dans la désignation normalisée des alliages de cuivre, la première lettre du symbole est la lettre **U,** caractéristique du cuivre qui est le métal de base.

Ex. : U 9. C'est du cuivre à 99,95 %.

— U. E 9. P. Alliage de cuivre à 9 % d'étain et d'une teneur en phosphore plus faible et non déterminée. C'est un bronze phosphoreux.

— U. Z 40. Alliage à 40 % de zinc. C'est un laiton de décolletage.

— U. Z 30. Alliage de cuivre à 30 % de zinc. C'est un laiton d'emboutissage.

— U. Z 20. N 20. Alliage de cuivre à 20 % de zinc et 20 % de nickel. C'est du maillechort.

PRODUITS FRITTÉS

Les **produits frittés** ne sont pas des alliages mais des agglomérés de poudres métalliques. Leur cohésion est obtenue par pression puis par fusion au four de l'un des constituants qui sert de liant. Cette opération s'appelle le **frittage.**

I. — CARBURES MÉTALLIQUES

Les carbures métalliques sont des mélanges de poudres de carbures de tungstène, de tantale, de titane, de bore. La liaison de ces carbures est obtenue par fusion de la poudre de cobalt jointe au mélange préalablement comprimé à 4 000 kg/cm^2 puis cuit à 850°.

A. PROPRIÉTÉS DES CARBURES MÉTALLIQUES

Les carbures métalliques ont une couleur gris clair. Densité 14 environ. Leur conductibilité thermique est plus faible que celle des aciers.

Dureté. Leur dureté naturelle — *Rockwell* C = 76 à 83 — est voisine de celle du diamant. Ils la conservent jusqu'à 1 000° environ.

Ténacité. Leur ténacité est remarquable aux sollicitations à la compression — $(R_r)_c = 420\ kg/mm^2$ — mais elle n'excède pas 200 kg/mm^2 pour la rupture par flexion.

Malléabilité. Nulle même à chaud.

B. TRAVAIL DES CARBURES MÉTALLIQUES

Les carbures métalliques ne peuvent être ni moulés, ni forgés, ni laminés.

Leur usinabilité n'est possible qu'à la meule dont l'abrasif est du diamant ou du carbure de silicium. Un arrosage abondant est recommandable au cours du meulage.

Leur liaison à l'acier qui leur sert de support est réalisée par brasage au cuivre électrolytique.

C. EMPLOI DES CARBURES MÉTALLIQUES

En raison de leur grande dureté, les carbures sont utilisés :

— pour des pièces supportant des frottements à pression élevée : filières d'étirage ou de tréfilage ;

— pour des outils de coupe : outils de tournage, de rabotage, fraises, forets (voir cours de 3e, seizième leçon) ;

— pour des outils de forage : partie active des trépans pour forage du sol.

Au cours du travail de coupe, qui est toujours exécuté à grande vitesse, la chaleur ne modifie pas la structure du composé et ne diminue pas sa dureté. Ce n'est donc pas la dureté qui doit être prise comme critère d'emploi mais la nuance, qui dépend des constituants.

C'est la raison pour laquelle il existe des carbures adaptés spécialement à chaque métal à usiner et à chaque genre de travail (travail sans chocs, travail avec chocs).

D'autre part, leur faible conductibilité thermique explique en partie :

— pourquoi une pastille épaisse (outil neuf) a une durée de coupe supérieure à celle d'une pastille mince (outil usé). Il n'y a cependant pas proportionnalité entre la durée de l'outil et le volume de la plaquette ;

— que le refroidissement après brasage doive être très lent, afin d'éviter le criquage de la pastille ;

— qu'il ne faut pas au cours du meulage ou du travail de coupe, faire passer l'outil par de brusques différences de température qui provoqueraient le criquage de la pastille.

II. — PIÈCES MÉCANIQUES FRITTÉES

Des pièces mécaniques sont également réalisables par frittage. En particulier, on obtient ainsi des bagues de frottement composées de 90 % de poudre de cuivre et 10 % de poudre d'étain. Ces pièces étant poreuses, il est possible de les imprégner d'huile. Cette absorption est faite sous vide et peut atteindre 30 % du volume des pièces.

Dans ce cas, les pièces sont dites auto-lubrifiantes et sont tout indiquées pour des organes soumis au frottement : bagues de paliers par exemple.

Résumé

LE CUIVRE ET SES ALLIAGES

Le cuivre, en raison de sa faible dureté, n'est pas utilisé en construction mécanique. Par contre, sa bonne conductibilité électrique et sa ductilité en font le métal idéal pour la construction électrique.

Les alliages de cuivre sont :

— ***les bronzes.*** **Les bronzes mécaniques, ou bronzes phosphoreux, contiennent 10 à 15 % d'étain et 0,1 à 0,3 % de phosphore. Ils sont surtout employés pour des pièces frottantes ébauchées par moulage.**

Certains bronzes spéciaux, à l'aluminium, sont malléables et forgeables.

— ***les laitons.*** **Ce sont des alliages cuivre-zinc utilisés pour le décolletage ou l'emboutissage selon la teneur du zinc qui ne dépasse jamais 40 %.**

Les laitons sont ductiles, malléables mais s'écrouissent facilement; c'est pourquoi leur chaudronnage exige des recuits fréquents.

— ***le maillechort.*** **Cet alliage cuivre-zinc-nickel est inoxydable, ductile et malléable. Il est utilisé pour la construction des rhéostats, d'instruments de dessin, de pièces décoratives...**

La pente effective de coupe des outils utilisés pour l'usinage du cuivre est de 40°. Elle est nulle pour la coupe du laiton, du bronze et du maillechort.

LES CARBURES MÉTALLIQUES

Ces produits, obtenus par frittage, sont des agglomérés de carbures de tungstène, de titane, de tantale et de bore.

La grande dureté des carbures métalliques et leur pouvoir de conservation de cette dureté jusqu'à haute température justifient leur emploi dans la confection des outils de coupe et des filières d'étirage.

Il existe plusieurs nuances de carbures adaptées à la nature des métaux à usiner et aux conditions d'usinage.

Les carbures métalliques sont sensibles aux brusques changements de température, d'où nécessité de prendre des précautions pour le brasage et l'affûtage des outils.

PIÈCES MÉCANIQUES FRITTÉES

Certaines pièces mécaniques peuvent être obtenues par frittage. Ces pièces étant poreuses, il est possible de les imprégner d'huile et de les utiliser avec intérêt comme coussinets auto-lubrifiants.

TROISIÈME PARTIE

LES TRAITEMENTS THERMIQUES

Chauffage et contrôle de la température.

Équilibre des alliages fer-carbone.

La trempe, le recuit, le revenu.

La cémentation et la nitruration.

PROTECTION DES PIÈCES CONTRE L'OXYDATION

Causes de la corrosion.

Traitements préventifs.

LES TRAITEMENTS THERMIQUES

Le chauffage suivi du refroidissement modifie les propriétés mécaniques des métaux et de leurs alliages.

Sous le terme général de **traitements thermiques** on englobe donc les modalités de la **chauffe** et du **refroidissement** adaptés aux caractéristiques nouvelles que l'on désire obtenir.

MOYENS DE CHAUFFAGE

Nous verrons au cours de la 12e leçon que la chauffe doit être conduite méthodiquement et la température mesurée avec précision. Mais comme on ne dispose pas toujours d'un matériel adapté à ces besoins, nous ne négligerons pas de signaler ici le feu de forge.

I. — FEU DE FORGE (fig. 58)

Ce moyen primitif n'est pas employé industriellement en raison des défauts qu'il présente :

— Oxydation et décarburation des pièces si elles sont placées dans la zone oxydante du foyer;

— impossibilité de mesurer la température de la pièce avec précision. Elle est évaluée approximativement à la couleur prise par la pièce au cours du chauffage (voir page « Couleurs et éclats »);

— difficultés de chauffage des pièces de grandes dimensions;

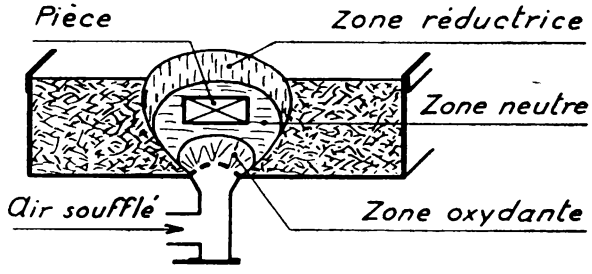


FIG 58. *Schéma d'un feu de forge.*

— production faible et d'un prix de revient élevé car il y a perte de chaleur.

II. — FOURS

Les défauts inhérents au feu de forge ont conduit au chauffage dans des chambres fermées afin d'assurer :

— le contrôle de la température des pièces par mesure de la température dans la chambre ;

— l'isolement des pièces d'avec le combustible, ce qui évite l'altération du métal chauffé ;

— la diminution du prix de revient par possibilité de traiter plusieurs pièces à la fois avec une déperdition de chaleur nettement plus petite qu'au feu de forge.

Ce sont là les gros avantages des fours auxquels il faut ajouter celui d'une conduite facile.

Industriellement les pièces sont donc chauffées dans des fours. Les divers types de fours dépendent du traitement envisagé et du combustible employé.

A. FOURS A COMBUSTIBLE SOLIDE (fig. 59).

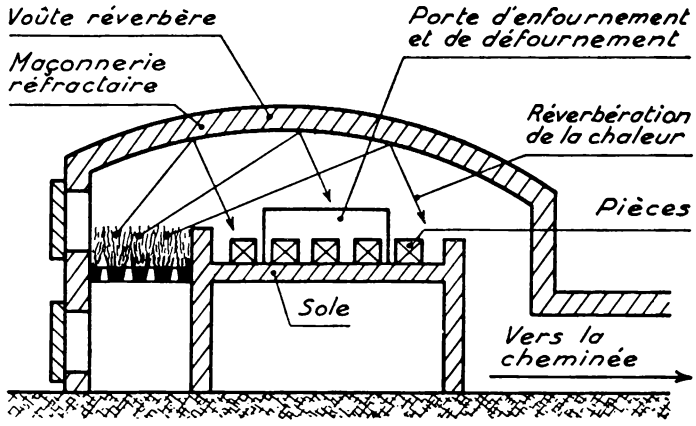


Fig 59 — *Schéma d'un four à coke*

Le combustible (coke) et les pièces sont isolés par une cloison limitant le foyer et la sole et obligeant les produits de la combustion — gaz et fumée — à s'écouler sans contact trop prononcé avec les pièces.

Leur principe même conduit à une capacité relativement grande, de sorte que la mise à température et le refroidissement sont assez longs. Ils ne sont donc employés que pour traiter un grand nombre de pièces à la fois.

B. FOURS A COMBUSTIBLE LIQUIDE OU GAZEUX

En diminuant la capacité du four et en remplaçant le combustible solide par un combustible liquide (mazout) ou gazeux (gaz de ville, gaz de haut fourneau) on peut obtenir une mise à température plus rapide du four. Ces combustibles ont en effet un grand pouvoir calorifique et leur allumage est instantané.

Quel que soit le combustible, ces fours sont construits suivant le même principe (fig. 60). Le mazout ou le gaz sont entraînés par de l'air sous pression et passent dans des brûleurs où le mélange est enflammé.

Pour éviter l'oxydation des pièces, on les isole parfois dans des moufles en graphite et la combustion du mélange se fait toujours sous la sole de la **chambre de chauffe.**

L'air chaud n'est évacué qu'après passage dans la **chambre de préchauffe** où sont placées les pièces froides, ce qui leur permet de passer lentement la **zone de fragilité** (voir treizième leçon).

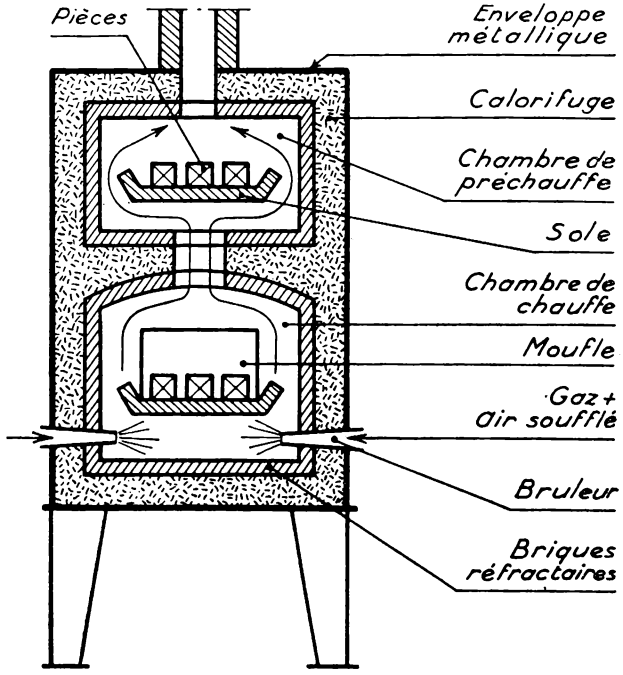


FIG 60 — *Schéma d'un four à gaz (Meker)*

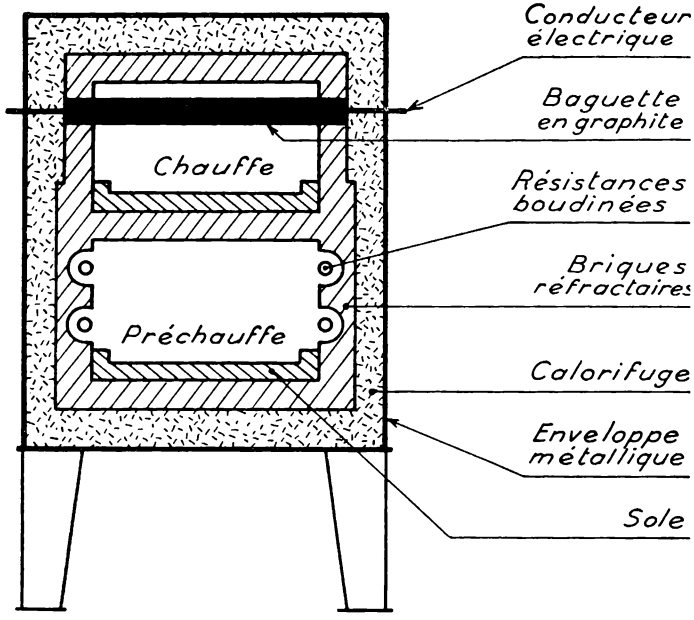


FIG 61 — *Schéma d'un four électrique à résistances encastrées (Huni)*

Les déperditions de chaleur seraient importantes du fait que l'enveloppe du four est métallique et que les parois des chambres sont relativement minces, aussi sont-ils calorifugés pour les diminuer.

C. FOURS ÉLECTRIQUES

Le four électrique (fig. 61) évite le contact des pièces avec les gaz provenant directement de la combustion.

La chaleur est provoquée par le passage

du courant électrique dans des résistances en alliage nickel-chrome (jusqu'à 800°) ou en baguette de graphite (jusqu'à 1 350°).

Les résistances sont généralement encastrées pour éviter leur détérioration pendant l'enfournement et le défournement des pièces.

Le fonctionnement et le réglage des fours électriques sont très sûrs.

CONTROLE DE LA TEMPÉRATURE

Le contrôle de la température des pièces chauffées est nécessaire car le plein effet d'un traitement thermique dépend beaucoup de la précision de la chauffe.

Ce contrôle peut s'effectuer par l'observation des couleurs et éclats des pièces chauffées ou à l'aide d'appareils de mesure spéciaux.

I. — COULEURS ET ÉCLATS

Les métaux ferreux, *blanchis* à sec à l'outil ou à la toile émeri, se couvrent d'oxydes de couleurs différentes pour des températures allant de 200 à 350° environ. Les couleurs les plus remarquables et les températures correspondantes sont les suivantes :

Jaune paille clair 215° — Jaune paille foncé 235° — Gorge de pigeon 245° — Violet 275° — Bleu 300° — Vert 330° — Noir 350°.

La couleur noire correspond à des températures qui s'étendent de 350 à 500°. On peut les déterminer à l'aide d'une baguette de peuplier bien sec, taillée en pointe, que l'on frotte sur la pièce et qui peut donner lieu aux observations suivantes.

Bois glissant 350° — Bois fumant 400° — Bois pétillant 450° — Bois flambant 500°.

A partir de 500°, le métal devient rouge : c'est l'éclat.

Rouge naissant 550° — Rouge sombre 600° — Rouge 700° — Rouge cerise naissant 800° — Rouge cerise 900° — Rouge cerise clair 1 000° — Jaune 1 100° — Jaune clair 1 200° — Blanc 1 300° — Blanc soudant ou blanc éblouissant 1 400°.

L'évaluation empirique de la température par les couleurs et éclats laisse une grande marge d'erreur, quelquefois de l'ordre de 100°.

II. — APPAREILS SPÉCIAUX

Une température ne peut être évaluée qu'indirectement, par observation des variations d'un phénomène liées à la température du four où sont chauffées les pièces.

A. THERMOMÈTRE A MERCURE

Il peut mesurer des températures jusqu'à 350°. On l'emploie pour certains **revenus** ou pour le chauffage du zinc (175°) en vue de son laminage.

B. PYROMÈTRE THERMO-ÉLECTRIQUE

Pour rendre la lecture continue, hors du four et même à assez grande distance, on a créé le pyromètre thermo-électrique.

Le principe de cet appareil est le suivant (fig. 62) : si l'on soude l'un à l'autre, par leurs extrémités, deux fils de métaux différents, on constitue un circuit fermé parcouru par un faible courant électrique. On intensifie ce courant en maintenant les deux soudures à des températures différentes **T** et **t**. L'intensité qui traverse le circuit est proportionnelle à la différence **T—t** des températures des soudures. Elle agit sur le galvanomètre en déplaçant son aiguille.

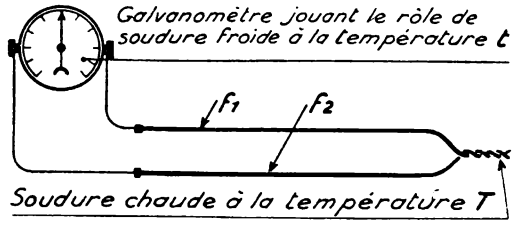


Fig 62 — *Schéma de principe du pyromètre thermo-électrique*

Pour avoir une lecture directe de la température, il suffit donc de graduer le galvanomètre en degrés.

Le pyromètre thermo-électrique industriel, ou canne *Le Chatelier* (fig. 63) est basé sur ce principe.

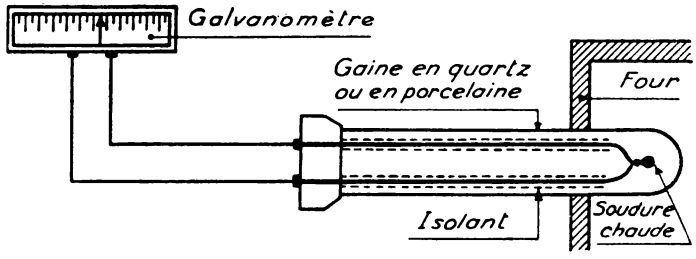


Fig 63 — *Schéma de la canne Le Chatelier*

Les deux fils constituant le couple thermo-électrique sont isolés et placés dans une gaine protectrice. Ils sont reliés aux bornes d'un galvanomètre gradué en degrés.

L'extrémité de la canne est plongée dans le four sur une longueur de 15 *cm* environ.

Les principaux couples de métaux employés sont :

Fer-constantan (1) utilisé jusqu'à 800°;

Nickel-chrome pour mesurer jusqu'à 1 100°;

Platine-platine rhodié (2) utilisé de 700 à 1 450°.

En raison même du principe de la canne *Le Chatelier*, la mesure est entachée d'erreur :

— par les variations de température de la *soudure froide*.

(1) Le constantan est un alliage demi-cuivre demi-nickel.
(2) Le platine rhodié du couple est constitué par 90% de platine et 10% de rhodium.

Il ne faut donc pas placer le galvanomètre trop près du four ou corriger la lecture en fonction de la température relevée au voisinage du galvanomètre ;

— par les variations de la résistance électrique des conducteurs qui relient le galvanomètre aux bornes de la canne. Il ne faut donc utiliser que les conducteurs livrés avec l'appareil.

C. LUNETTE A DISPARITION DE FILAMENT

Pour éviter encore l'influence de facteurs étrangers au four lui-même, on a mis au point des méthodes de mesure optique.

Au moyen d'une lunette de visée (fig. 64), et à travers un écran rouge, on observe l'image des pièces placées dans le four en même temps que l'image du filament d'une lampe électrique alimentée par pile. A l'aide d'un rhéostat, on peut, en faisant varier l'intensité du courant, faire varier l'éclat du filament, c'est-à-dire sa **brillance.**

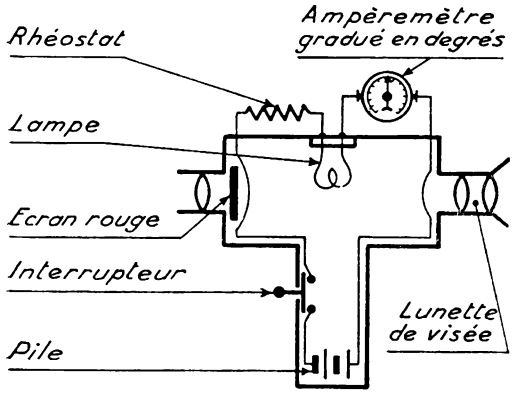


FIG 64 — *Schéma de principe d'une lunette à disparition de filament*

Si la brillance de la lampe est supérieure à celle du four, le filament apparaît avec un éclat supérieur à celui de la pièce.

Si, au contraire, la brillance du four est supérieure à celle de la pièce, le filament apparaît en noir sur la pièce.

En manœuvrant le rhéostat, on peut obtenir une brillance du filament égale à celle du four, identité obtenue lorsque l'image du filament disparaît. On lit alors la température du four sur le cadran gradué d'un ampèremètre intercalé dans le circuit.

L'appareil est portatif et il permet la mesure précise de températures variant de 800 à 2 500°.

D. MONTRES FUSIBLES DE SEGER

Les montres de *Séger* (fig. 65) sont constituées par de petites pyramides triangulaires tronquées, faites avec des mélanges de kaolin, de carbonate de chaux, d'oxydes de fer ou de plomb. Ces pâtes, durcies, fondent à des températures connues espacées de 20 en 20°.

Les montres sont placées par trois sur des plaques en terre réfractaire (fig. 66) et introduites dans le four.

Lorsque la température est atteinte (800° par exemple) la montre marquée 800° est courbée, celle marquée 780° est couchée tandis que celle marquée 820° est encore debout.

On emploie surtout les montres de *Séger* pour la cuisson des émaux et assez peu pour les traitements thermiques.

Fig 65_ *Montre de Séger*

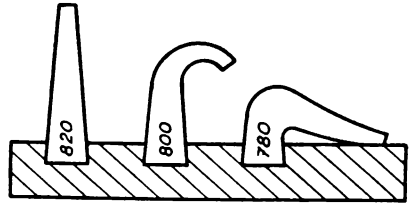


Fig 66_ *Emploi de montres pour évaluer la température de 800°*

Résumé

Le traitement thermique consiste à chauffer un produit métallurgique puis à le refroidir en vue de modifier ses propriétés mécaniques.

CHAUFFAGE DES PIÈCES

Feu de forge. **Ce moyen n'est pas employé industriellement car il est peu sûr et coûteux.**

Pour diminuer les risques d'oxydation des pièces il faut les chauffer dans la zone neutre du foyer.

Fours. **Ils permettent une grande production et un chauffage précis parce qu'il peut être contrôlé.**

Les combustibles sont solides liquides ou gazeux. Les fours électriques suppriment le contact des gaz brûlés et des pièces.

CONTROLE DE LA TEMPÉRATURE

Le résultat du traitement thermique dépendant de la précision de la chauffe, il faut contrôler la température.

Le contrôle fait au jugé par l'observation des couleurs et éclats est imprécis. La précision est obtenue par utilisation :

— ***du thermomètre à mercure*** **jusqu'à 350°;**

— ***de la canne pyrométrique Le Chatelier*** **constituée par deux métaux formant un couple thermo-électrique et dont une soudure placée dans le four est chaude et l'autre constituée par un galvanomètre extérieur est froide. Le courant électrique d'intensité proportionnelle à la différence de température des soudures parcourt le galvanomètre qui indique la température du four;**

— ***de la lunette à disparition de filament.*** **L'observation simultanée d'un filament de lampe électrique, dont on peut régler la température, et des pièces logées dans le four permet de contrôler l'identité de leur brillance.**

La température correspondante est lue alors sur l'ampèremètre gradué en degrés appartenant au circuit.

— ***des montres fusibles de Séger.*** **Ce sont des pyramides triangulaires constituées par des pâtes de compositions différentes et fondant à des températures espacées de 20 en 20°. Placées par trois dans le four, leur degré de ramollissement marque les températures T + 20°, T° et T — 20°, ce qui permet de régler le four à la température T°.**

DOUZIÈME LEÇON

LES TRAITEMENTS THERMIQUES (Suite)

EQUILIBRE DES ALLIAGES FER-CARBONE

Avant de passer à l'étude proprement dite des traitements thermiques, il est nécessaire de définir les lois qui les régissent et nous ferons appel à quelques notions générales de physique.

I. — FUSION ET SOLIDIFICATION D'UN CORPS PUR

A. RAPPEL DES LOIS DE LA FUSION BRUSQUE (fig. 67).

1re Loi. Un corps pur fond toujours à la même température **Tf** appelée température de fusion ou point de fusion.

2e Loi. La température d'un **corps pur** en fusion reste constante pendant toute la durée de la fusion.

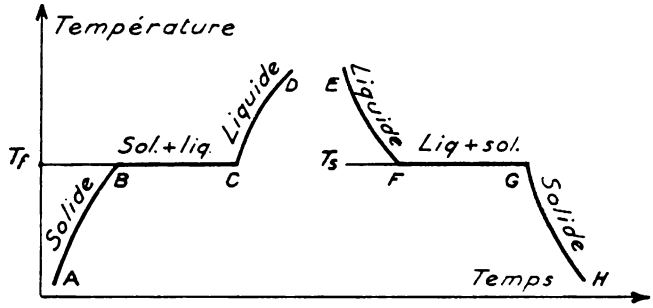


FIG 67 — *Courbes d'échauffement et de refroidissement d'un corps pur*

B. SOLIDIFICATION.

Au cours de la solidification due au refroidissement (fig. 67) on observe des phénomènes identiques. La température de solidification **Ts** est égale à la température de fusion **Tf**.

II. — SOLIDIFICATION D'UN ALLIAGE

Dans le cas d'un alliage, les lois précédentes ne sont plus valables.

Refroidissons lentement un alliage plomb-étain riche en plomb, de la soudure des plombiers préalablement fondue par exemple (fig. 68). Les premiers cristaux solides apparaissent à la température de solidification commençante **Tc** qui est inférieure à la température de fusion du plomb pur (326°). Ces cristaux sont cependant du plomb pur et, pendant que leur masse augmente, l'alliage fondu s'enrichit en étain et sa

température s'abaisse jusqu'à 170°, température qui se maintiendra jusqu'en fin de solidification. Les cristaux qui se déposent à cette dernière température contiennent à la fois du plomb et de l'étain.

Donc :

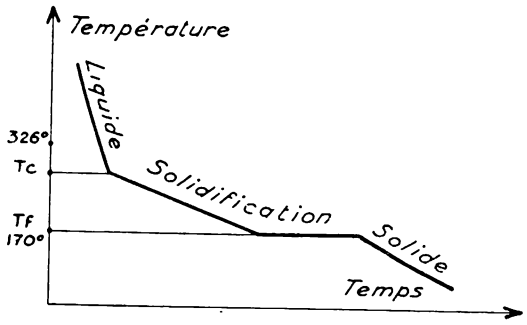


FIG 68 — *Solidification d'un alliage plomb-étain*

1° la température ne reste pas constante pendant toute la durée de la solidification de l'alliage ;

2° la composition du solide qui se dépose n'est pas identique pendant toute la solidification.

Avec un alliage plomb-étain de composition différente nous constaterions :

1° une température de solidification commençante différente de la précédente mais toujours inférieure à 326° ;

2° que les premiers cristaux formés sont du plomb pur si l'alliage est riche en plomb, de l'étain pur si l'alliage est riche en étain ;

3° que dans tous les cas la température de solidification finissante est 170° ;

4° que les cristaux mixtes qui se déposent alors sont de **composition invariable** (33 % de plomb — 67 % d'étain).

Ils constituent un eutectique.

III. — TRANSFORMATIONS ALLOTROPIQUES DU FER PUR

Un même corps peut exister sous des états pouvant manifester à la fois des propriétés chimiques identiques et des propriétés physiques différentes. On dit que le corps présente des **variétés allotropiques.**

Le carbone, par exemple, existe sous forme de carbone amorphe (noir de fumée, charbon de sucre) et de carbone cristallisé (diamant, graphite). Ces variétés sont d'aspect et de dureté différente et cependant toutes donnent en brûlant du gaz carbonique CO_2.

Le fer, qui est un corps pur, existe sous quatre variétés allotropiques (Tableau n° 4).

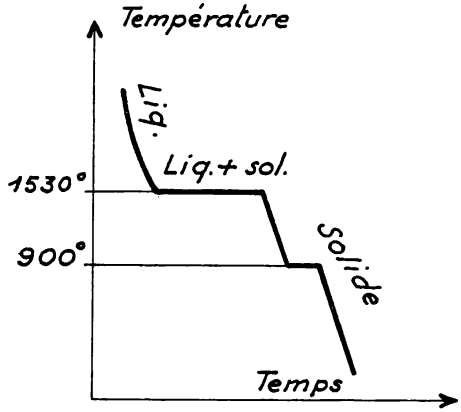


FIG 69 — *Points de transformation du fer pur.*

Le passage d'une variété à une autre (fig. 69), **ou transformation allotropique, se fait à l'état solide et se traduit sur la courbe d'échauffement ou de refroidissement par des paliers (température constante) analogues à ceux de la fusion ou de la solidification, mais moins étendus.**

Les températures correspondant à chaque transformation sont appelées *points de transformation* ou encore *points critiques*.

Variété	Zone de température	Propriété magnétique	Comportement envers le carbone
Fer α ou ferrite	au-dessous de 775°	magnétique	ne dissout pas le carbone
	entre 775 et 900°	non magnétique	ne dissout pas le carbone
Fer γ	entre 900 et 1400°	non magnétique	dissout le carbone
Fer α	au-dessus de 1400°	non magnétique	dissout peu le carbone

Tableau N°4 - *Variétés allotropiques du fer pur. Seul le fer α en-dessous de 775° est magnétique, seul le fer γ dissout le carbone.*

IV. — ÉTUDE DE L'ALLIAGE FER-CARBONE

A. ASPECT DE L'ALLIAGE SOLIDE

Alors que dans un corps pur les cristaux sont identiques chimiquement, ils ne le sont pas dans un alliage.

Ainsi l'alliage solide fer-carbone n'est pas homogène, mais formé de cristaux juxtaposés de très petites dimensions, inférieures au dixième de millimètre. L'observation au microscope fait apparaître dans sa masse :

— du **fer pur** ou **ferrite**;

— une composition chimique nettement définie : la combinaison **Fe_3 C** qui est de la **cémentite**, ou carbure de fer;

— un agrégat très fin de ferrite et de cémentite, appelé **perlite.**

La proportion des constituants varie avec la température à plus de 720° et, en particulier, en augmentant la température d'un alliage solide fer-carbone on peut réduire sa teneur en cémentite.

B. ETATS STABLE ET MÉTASTABLE DE L'ALLIAGE FER-CARBONE

Le fer liquide peut dissoudre plus de 6 % de carbone.

Ayant réalisé cet alliage à haute température, si nous le laissons refroidir :

1° **Lentement,** le carbone se dépose presque entièrement à l'état libre sous forme de graphite. De plus, l'alliage ne subit aucune modification chimique si on le porte de nouveau à haute température. On dit que le **système ainsi obtenu est à l'état stable.**

L'expérience montre que la formation de l'état stable est favorisée par le ralentissement du refroidissement et par une teneur en carbone élevée.

2° **Rapidement,** le carbone se fixe dans l'alliage sous forme de **cémentite.**

Par réchauffage prolongé aux environs de 800°, on obtiendrait la décomposition de la cémentite, ce qui montre que le système n'est pas stable. On dit qu'**il est à l'état métastable, ou état labile.**

Cet état métastable est celui des aciers, en raison de leur faible teneur en carbone : de 0,05 à 1,5 %.

C. DIAGRAMME DE TRANSFORMATION

Au cours du refroidissement d'un alliage fer-carbone à faible teneur en carbone (cas des aciers) on ne constate aucune modification allotropique jusqu'aux environs de 1 000°. Au-dessous de ce stade, les transformations au refroidissement se font à des températures différentes selon la teneur en carbone.

Le diagramme de la figure 70 indique la position de ces températures.

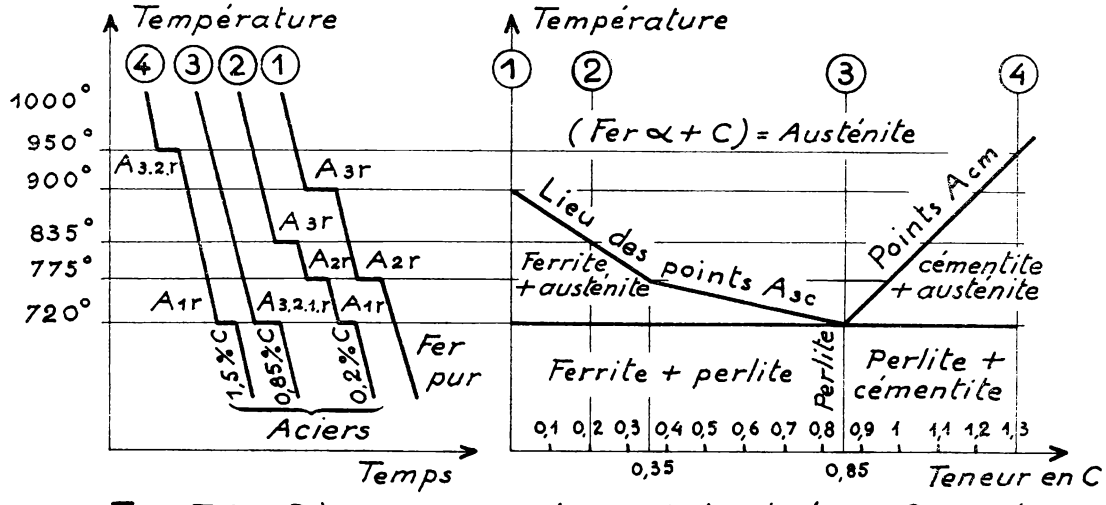


FIG 70 - Diagramme des points de transformation au refroidissement.

Fer pur. La courbe **(1)** résume les états du fer pur déjà notés sur le tableau n° 4. En particulier :

— à 900° le fer γ se transforme en fer α non magnétique et la température qui correspond à cette première transformation est dite **point A_{3r} (refroidissement)** ;

— à 775° le fer se transforme en fer α magnétique et la température qui correspond à cette deuxième transformation est dite **point A_{2r}.**

Remarquer que le fer ne dissout le carbone qu'au delà du point A_{3r} c'est-à-dire au-dessus de 900°.

Acier à 0, 2 % de carbone. La courbe **(2)** montre que :

— la première transformation A_{3r} se fait à 835° ;

— la deuxième transformation A_{2r} se fait à 775° ;

et qu'il y a une nouvelle transformation A_{1r} qui se situe à 720° et par laquelle le fer se transforme en fer α avec formation de perlite.

La position de ce troisième point de transformation A_{1r} est indépendante de la teneur en carbone de l'acier ; il est invariablement à 720°.

Acier à 0,85 % de carbone. La courbe **(3)** montre que pour cette teneur particulière en carbone, il n'y a qu'un seul point de transformation localisé à 720°, qui est la jonction des points A_{3r}, A_{2r} et A_{1r}. On lui donne le nom de point $A_{3.2.1.r}$ pour marquer sa particularité.

Acier à 1,3 % de carbone. La courbe **(4)** montre que l'alliage présente deux points de transformation dont l'un, situé à 950° est dit point A_{cm} (point de cémentite) et l'autre, situé à 720°, marque la formation de la perlite.

Cette courbe est caractéristique de tous les aciers dont la teneur en carbone est comprise entre 0,85 et 1,5 %.

Diagramme. La courbe qui joint les points A_{3r} obtenus pour les aciers de teneur en carbone croissante et la droite horizontale correspondant aux points A_{1r}, à 720°, délimitent :

— une zone comprise au-dessus de la courbe A_{3r} où l'alliage se présente sous la forme de solution de fer γ et de carbone, l'austénite,

— deux zones comprises entre les deux courbes où l'alliage se présente sous la forme de ferrite + austénite ou de cémentite + austénite ;

— une zone comprise au-dessous de la droite A_{1r} où l'alliage se présente sous la forme de ferrite + perlite ou de perlite + cémentite.

V. — ÉQUILIBRE DE L'ALLIAGE FER-CARBONE

Un alliage fer-carbone (acier), pris à la température ambiante, devrait présenter à l'échauffement des points de transformation correspondant aux précédents.

Or, cet équilibre de l'alliage ne peut être obtenu que pour des vitesses de chauffe ou de refroidissement excessivement lentes. En pratique, il sera donc impossible de réaliser les transformations aux températures correspondant au diagramme théorique.

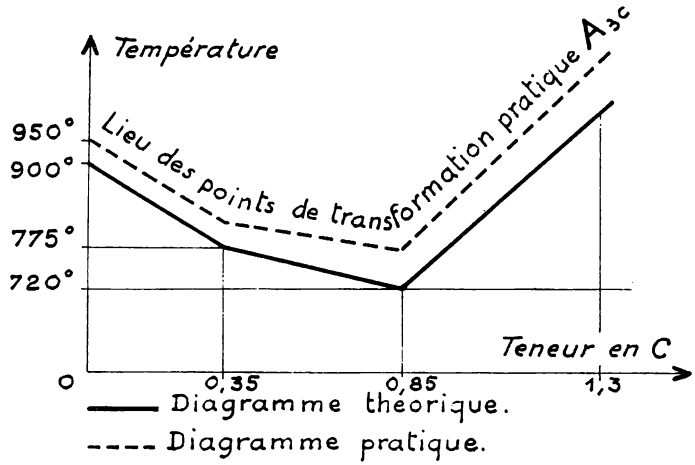


FIG 71 - *Les points de transformation pratiques à l'échauffement sont situés environ 50° au-dessus du diagramme théorique.*

En particulier, la transformation à l'échauffement se fera entièrement avec un retard de 50° environ sur les points théoriques. De sorte que pour transformer l'alliage à 0,2 % en austénite, il faudra porter cet alliage à 835 + 50 = 885°; pour 0,85 % de carbone, la transformation de perlite en austénite se fera à 720 + 50 = 770°.

Le diagramme donné par la figure 71 montre le retard de la transformation à l'échauffement.

VI. — CONCLUSION

Lorsqu'on porte un acier à une température supérieure à son point de transformation à l'échauffement A_{3c}, on observe une modification de sa structure aussi bien physique, cristaux plus petits, que chimique, constituants différents. **On obtient de l'austénite.**

Le refroidissement lent redonne à l'acier la structure et les constituants qu'il avait à froid.

Le refroidissement brusque ne permet pas le retour aux caractéristiques d'origine pour les aciers contenant de 0,3 à 1,3 % de carbone. La transformation au refroidissement ne pouvant pas se faire normalement l'acier se présente sous la forme d'aiguilles fines très dures, **la martensite. Il est trempé.**

Une nouvelle chauffe au-dessus du point de transformation A_{3c} transforme la martensite en austénite et le **refroidissement lent** redonne à l'acier ses caractéristiques d'origine. **Il est recuit.**

Seul le fer γ est capable de dissoudre le carbone. Il s'ensuit que pour incorporer du carbone au fer, ou à un acier qui en contient déjà, il faudra le porter à une température supérieure au point de transformation A_{3c}. L'opération se pratique sous le nom de **cémentation.**

Résumé

VARIÉTÉS ALLOTROPIQUES DU FER PUR. — Le fer pur, suivant la température à laquelle il est porté, se présente sous trois formes principales :

— fer α, au-dessous de 775°, magnétique,

— fer α, entre 775 et 900°, non magnétique,

— fer γ, entre 900 et 1400°, qui dissout le carbone.

CARACTÉRISTIQUES DE L'ALLIAGE FER-CARBONE OU ACIER. — Jusqu'à 0,3 % de carbone, l'acier se comporte sensiblement comme le fer pur. En le portant à une température de l'ordre de 850 à 900°, il sera susceptible de dissoudre le carbone mis en sa présence; c'est le but de la cémentation.

Pour une teneur comprise entre 0,3 et 1,5 % de carbone, l'acier présente un point de transformation, dit A_3, pour lequel un changement profond de la texture et des constituants se manifeste.

La transformation à l'échauffement fait apparaître au-dessus du point A_3 des cristaux petits.

Le refroidissement brusque provoque alors la trempe, en empêchant la transformation inverse, et fait apparaître des aiguilles fines et très dures (la martensite).

Le nouvel échauffement au-dessus du point A_3 et le refroidissement lent provoquent le recuit, en favorisant les transformations, et redonnent à l'acier ses caractéristiques premières.

Le diagramme d'équilibre de l'alliage fer-carbone donne les températures correspondant aux points de transformation, ou points critiques, d'après la teneur en carbone.

LES TRAITEMENTS THERMIQUES (Suite)

LA TREMPE DES ACIERS

I. — ETUDE PRÉALABLE DE LA CHAUFFE DES ACIERS

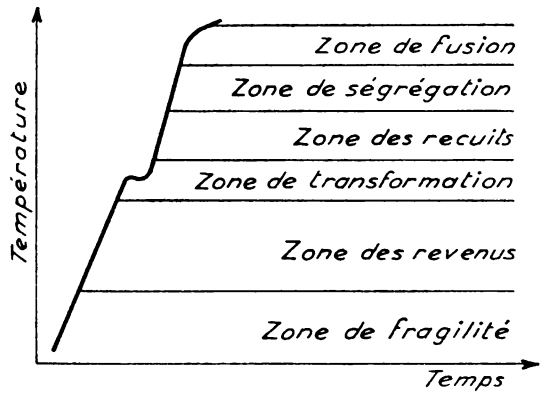


Fig 72 — *Graphique des zones de chauffage*

Au cours du chauffage, les aciers passent par les zones indiquées sur le graphique figure 72.

La zone dite de fragilité doit être passée lentement car le chauffage rapide entraînerait la dilatation plus rapide de l'extérieur que de l'intérieur, et provoquerait des tensions internes génératrices de déformations et de criques.

La zone des revenus ne marque qu'une modification des caractéristiques mécaniques de l'acier, nous y reviendrons dans la leçon quatorzième.

La zone des transformations comprend les points A_3 pour lesquels l'alliage subit les modifications internes les plus importantes du point de vue utilitaire.

La zone des recuits marque le retour de l'acier à l'état qu'il avait perdu par la trempe ou l'écrouissage, nous y reviendrons dans la leçon quatorzième.

A la zone de ségrégation correspond la séparation du carbone et des autres constituants. Le métal qui y parvient est dit **brûlé** ou **grillé**.

II. — PRINCIPE DE LA TREMPE

L'acier chauffé régulièrement au-dessus de son point de transformation A_{3c} subit une modification de structure : ses cristaux deviennent plus petits (austénite).

Le brusque refroidissement les fixe dans leurs caractéristiques en accentuant encore leur dureté et en leur donnant la forme d'aiguilles (martensite).

Le diagramme de trempe (fig. 73) indique les différentes phases de la transformation :

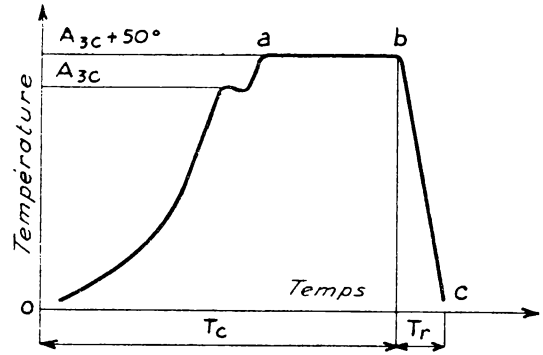


FIG 73 — *Diagramme de trempe. Temps de chauffage T_c beaucoup plus long que temps de refroidissement T_r.*

— **oa** : chauffage au-dessus du point de transformation $A_{3c} + 50°$,

— **ab** : maintien de la température constante nécessaire à la transformation complète à l'échauffement,

— **bc** : refroidissement rapide pour empêcher la transformation au refroidissement.

III. — BUTS DE LA TREMPE

Etant donné que l'opération de trempe :

— augmente la limite élastique, la résistance à la rupture et la dureté,

— diminue l'allongement pour cent, la résilience et la striction,

on utilisera la trempe chaque fois qu'on recherchera la variation de ces caractéristiques dans le sens indiqué.

En particulier, pour les aciers fortement carburés ou pour les aciers spéciaux à outils, le but principal sera d'obtenir une grande dureté. Pour les aciers faiblement carburés ou pour les aciers spéciaux de construction, le but sera l'amélioration de l'ensemble des propriétés mécaniques.

IV. — PRATIQUE DE LA TREMPE

A. CONDUITE DE LA CHAUFFE

Pour éviter les accidents au cours de la chauffe il faut :

— chauffer d'abord lentement afin de passer la zone de fragilité sans risques, jusqu'à 450° pour les aciers au carbone et 800° pour les aciers rapides,

— chauffer ensuite rapidement jusqu'au point $A_{3c} + 50°$ pour éviter l'oxydation qui modifierait la composition du métal et maintenir cette température pour que la transformation à l'échauffement soit complète car elle ne se fait que lentement de l'extérieur vers l'intérieur.

B. INFLUENCE DU REFROIDISSEMENT

Le temps de refroidissement, très court, empêche la transformation normale au refroidissement. Le métal est composé en grande partie de martensite, corps plus dur que la cémentite.

Mais, suivant le fluide utilisé, le refroidissement est plus ou moins rapide et la trempe est plus ou moins complète.

1° Trempe vive. Très brusque, elle donne la plus grande dureté aux aciers au carbone. On la réalise en plongeant la pièce chauffée dans un bain d'eau pure à 20° ou d'eau salée (5 % de sel marin) à 30 ou 50°. Le sel marin a pour effet d'augmenter la conductibilité thermique du bain.

2° Trempe douce. Plus lente, elle fait acquérir aux aciers au carbone une dureté moins grande.

Elle est obtenue dans des bains d'huile, de pétrole ou d'air soufflé. Actuellement, l'huile minérale traitée spécialement pour lui conserver sa stabilité est pratiquement la seule employée.

Remarque. Pour la trempe des aciers rapides, on utilise uniquement des bains d'huile, de pétrole ou d'air soufflé, car l'eau donnant une vitesse de refroidissement trop grande, provoquerait irrémédiablement des criques appelées tapures.

C. INSTALLATION DE TREMPE.

1° Trempe par immersion. La pièce est plongée entièrement dans le bain de refroidissement. Le bac de trempe doit avoir la plus grande capacité possible pour éviter l'échauffement du liquide.

Pour un bain d'eau on peut prévoir le renouvellement continu du liquide (fig. 74).

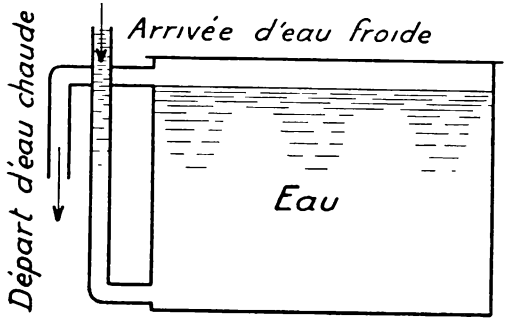


FIG 74 _ *Bain d'eau refroidi par renouvellement continu du liquide*

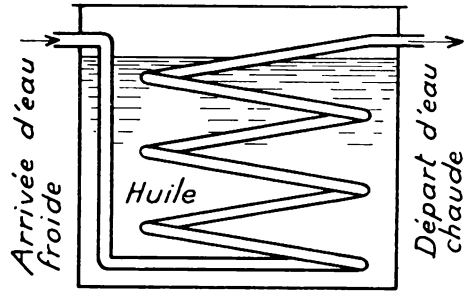


FIG 75 _ *Bain d'huile refroidi par circulation continue d'eau.*

Si le liquide coûte cher (huile) son refroidissement peut être assuré par circulation d'eau dans un serpentin (fig. 75) ou par de l'eau en pluie traversant le bain d'huile (fig. 76).

2° Trempe au jet. Lorsqu'on veut tremper une seule partie de la pièce, on pratique la **trempe au jet.** L'eau est envoyée contre la partie à tremper sous la forme de pluie (fig. 77).

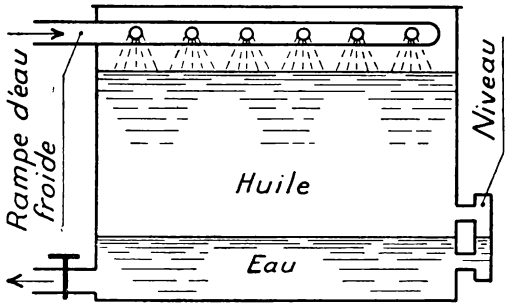


FIG 76 _ *Bain d'huile refroidi par de l'eau en pluie qui traverse l'huile.*

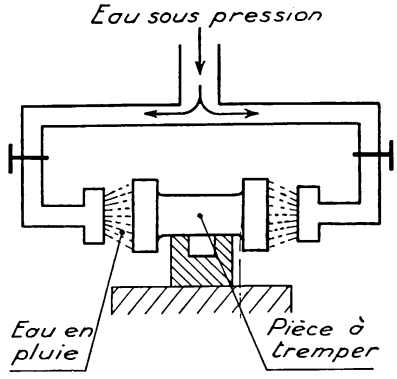


FIG 77 _ *Trempe au jet*

V. — ACCIDENTS DE TREMPE

On atténue les déformations et on évite les tapures :

— en se conformant strictement aux instructions données par le métallurgiste qui a élaboré l'acier,

— en passant la zone de fragilité lentement,

— en plongeant les pièces longues dans le bain suivant leur grand axe et les pièces plates sur champ. Pendant le refroidissement, en déplaçant les pièces verticalement pour éviter que des poches de vapeur se forment autour de la pièce, ce qui retarderait le refroidissement,

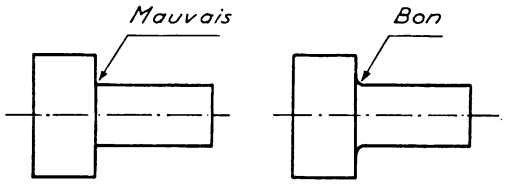


FIG 78 _ *Les angles vifs rentrants sont des zones de tensions qui favorisent les déformations et les tapures*

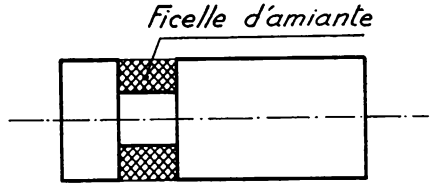


FIG 79 _ *Le refroidissement brusque de la partie étranglée est évité par l'enroulement de ficelle d'amiante*

— en supprimant les angles vifs rentrants, qui sont des amorces de rupture et en les remplaçant par des congés (fig. 78),

— en usant, dans certains cas, d'artifices consacrés par l'usage (fig. 79).

Remarques. 1° Pour éviter de *brûler* l'arête vive de certaines pièces (dents de scies, de limes, sommets de filets de vis) il faut les protéger par un engamage (1).

(1) Engamer une pièce c'est la recouvrir d'une pâte qui se carbonise au cours du chauffage en formant une gaine protectrice. Ainsi les arêtes vives des pièces ne sont plus sujettes au grillage.

2° Les fours généralement employés pour la trempe sont des fours à gaz, à mazout ou des fours électriques parce qu'ils possèdent une chambre de préchauffe qui permet de passer la zone de fragilité dans les meilleures conditions.

3° L'oxydation des pièces entraînant une décarburation de l'acier, opérer le chauffage dans un four à atmosphère réductrice, c'est-à-dire dépourvue d'oxygène en excès.

On se rend compte qu'un four à gaz a une atmosphère réductrice lorsque la flamme, au départ des brûleurs, présente une légère coloration bleue. Dans les fours électriques, placer quelques morceaux de charbon de bois sur la sole pour absorber l'oxygène.

VI. — CONTROLE DES RÉSULTATS

Le contrôle de la dureté est assuré par la méthode *Rockwell* avec pénétrateur en diamant.

Le contrôle de la structure résulte de l'observation micrographique. Elle permet de déceler avec précision la nature des constituants et, par suite, la valeur finale de la trempe.

VII. — TREMPE SUPERFICIELLE

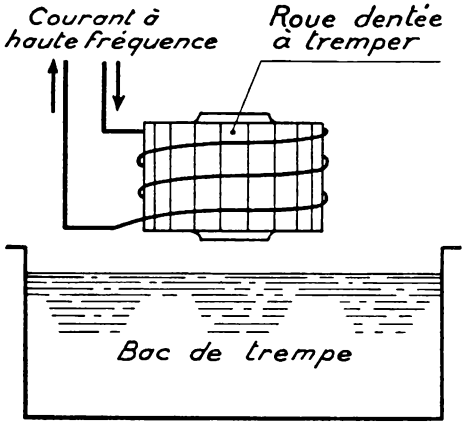


Fig 80 — *Principe de la trempe superficielle*

Lorsqu'une pièce est soumise au frottement, les surfaces de contact extérieures peuvent être trempées superficiellement. Ainsi, le cœur des pièces, non trempé, conserve une grande résilience.

Le chauffage est réalisé par des courants induits qui, localisés à la périphérie de la pièce, la portent au rouge sur 1 à 2 *mm* de profondeur (fig. 80). Elle tombe alors dans le bain de trempe pour le refroidissement brusque.

LA TREMPE DU DURALUMIN

Les caractéristiques maxima du duralumin sont obtenues après laminage à chaud suivi de trempe. Ainsi traité, l'alliage s'appelle **duralumin normal.**

Pour la trempe du duralumin, chauffer à 500° environ, puis refroidir rapidement dans l'eau pure. Le métal, mou aussitôt après la trempe, devient dur par vieillissement. Quatre heures après la trempe, il a acquis 90 % de ses caractéristiques maxima. Il les possède entièrement après quatre à cinq jours de vieillissement.

Résumé

La trempe modifie profondément les propriétés mécaniques du métal dans les sens suivants :

— la dureté, la ténacité et la limite élastique augmentent,

— l'allongement pour cent, la résilience et la striction diminuent.

TREMPE DES ACIERS. — La trempe donne aux aciers à outils une grande dureté et elle améliore les propriétés mécaniques générales des aciers de construction.

L'opération comporte un chauffage lent au début pour éviter les déformations et les criques du métal, puis rapide, pour éviter l'oxydation, jusqu'au point de transformation A_{3c}. Ensuite, le refroidissement brusque pour empêcher la transformation au refroidissement. Le métal conserve ainsi à froid la structure qu'il avait à chaud : il est trempé.

Les aciers au carbone et certains aciers spéciaux de construction se trempent à l'eau ou à l'huile. Les aciers rapides ne doivent être trempés qu'à l'huile, au pétrole ou à l'air soufflé.

Les accidents de trempe, déformations et tapures, sont atténués ou évités par l'observation de certaines précautions.

Les fours employés sont des fours à gaz, au mazout ou des fours électriques parce qu'ils possèdent une chambre de préchauffe.

La dureté est contrôlée par la méthode *Rockwell* C, la structure par la micrographie.

TREMPE DU DURALUMIN. — La trempe donne au duralumin ses caractéristiques maxima.

Chauffé à 500° puis refroidi dans l'eau pure, il est d'abord mou, et ce n'est qu'après un vieillissement de quatre ou cinq jours qu'il acquiert ses meilleures propriétés mécaniques.

QUATORZIÈME LEÇON

LES TRAITEMENTS THERMIQUES (Suite)

LE RECUIT DES ACIERS

I. — PRINCIPE DU RECUIT

L'acier chauffé régulièrement au-dessus de son point de transformation A_{3c} subit une modification de structure qui rétablit la stabilité de l'alliage. Le refroidissement très lent consécutif assure la transformation en perlite (fer α + cémentite) à l'état stable à froid. On dit alors que **l'acier est recuit.**

Le diagramme de recuit (fig. 81) indique les différentes phases de la transformation :

— **oa** : chauffage au-dessus du point de transformation A_{3c} ;

— **ab** : maintien en température constante pour obtenir un échauffement uniforme ;

— **bc** : refroidissement lent pour assurer la transformation au refroidissement à la température A_{3r}.

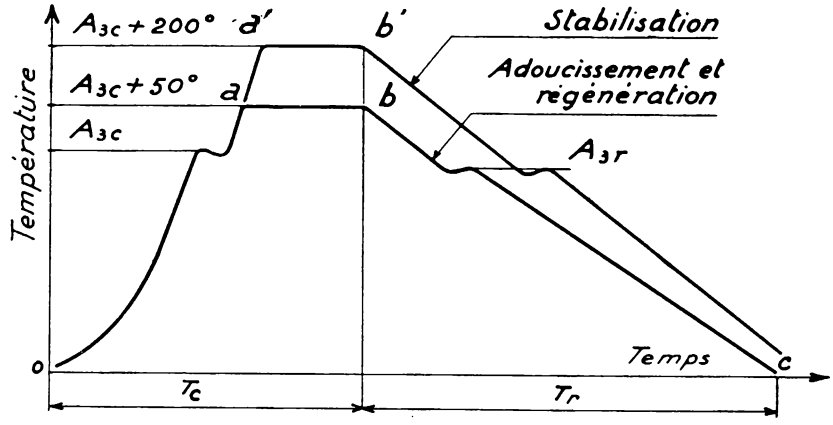


Fig 81 — *Diagramme du recuit. Temps de refroidissement T_r supérieur au temps de chauffage T_c.*

II. — BUTS DU RECUIT

Le principe même du recuit montre qu'un acier dont la structure interne a perdu son équilibre peut la retrouver par le jeu des transformations normales.

Le recuit sera donc pratiqué pour :

1° **Redonner au métal une constitution stable à froid,** c'est-à-dire supprimer les effets de la trempe ; c'est le cas du **recuit d'adoucissement.**

2° **Améliorer un métal altéré par des traitements thermiques poussés à trop haute température,** c'est-à-dire régénérer un acier qui a été surchauffé mais non brûlé ; c'est le cas du **recuit de régénération ou de recristallisation.**

3° **Supprimer les effets de l'écrouissage** résultant d'un travail mécanique opéré à froid (chaudronnage) ou les tensions internes provenant d'un forgeage à trop basse température ; c'est le cas du **recuit de stabilisation ou de normalisation.**

D'une façon générale le recuit modifie les propriétés mécaniques dans les sens suivants :

— la dureté, la ténacité et la limite élastique diminuent ;

— la résilience, l'allongement pour cent et la striction augmentent.

III. — PRATIQUE DU RECUIT

A. CONDUITE DE LA CHAUFFE

Le chauffage doit être lent au début pour passer la zone de fragilité sans risques de tapures, puis mené plus rapidement pour atteindre une température supérieure au point de transformation A_{3c} soit :

— A_{3c} + 50° pour les recuits d'adoucissement et de régénération (palier **ab**) (fig. 81) ;

— A_{3c} + 200° pour le recuit de stabilisation (palier **a'b'**).

Le maintien à température est nécessaire pour obtenir un échauffement uniforme des pièces, sa durée est de 5 à 10 minutes pour les aciers au carbone.

B. CONDUITE DU REFROIDISSEMENT

Le refroidissement doit être lent pour que la transformation au refroidissement au point A_{3r} se fasse complètement. Cette transformation redonne au métal son équilibre moléculaire, c'est-à-dire ses caractéristiques mécaniques normales.

Le plus souvent le refroidissement s'opère en laissant les pièces dans le four, feux éteints et portes fermées. C'est la raison pour laquelle on emploie de préférence, pour le recuit, des fours en maçonnerie ; leur masse les empêche de refroidir rapidement. Parfois, pour protéger les pièces contre l'effet des gaz provenant de la combustion, on les place dans des boîtes ou dans des moufles.

La durée du refroidissement doit être d'autant plus grande que la teneur en carbone est élevée.

C. RECUIT DES ACIERS RAPIDES

Les barres ou les outils à recuire sont noyés dans du sable contenu dans des caisses métalliques fermées et chauffées à 750-850°. Un maintien à température pendant 2 heures est nécessaire. Le refroidissement a lieu, les caisses dans le four, portes fermées et feux éteints.

Les pièces, logées dans le sable, sont à l'abri de l'oxydation et refroidissent **très lentement**, condition essentielle pour le bon recuit des aciers rapides.

Nota. Il faut toujours se conformer scrupuleusement aux instructions du métallurgiste qui a élaboré l'acier.

IV. — APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU RECUIT

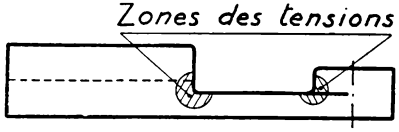


Fig 82 – *Le refroidissement rapide de la partie médiane a engendré des tensions internes*

— à la suppression des effets de la trempe, pour l'outillage en particulier,

— aux pièces forgées ou moulées présentant des tensions internes du fait que certaines de leurs parties ont refroidi plus rapidement que d'autres (fig. 82),

— aux pièces forgées ou laminées qui ont subi un écrouissage poussé, surtout en fin de travail lorsque la température est trop basse,

— aux pièces embouties. Entre deux passes d'emboutissage il faut recuire les pièces pour faire disparaître les effets de l'écrouissage,

— aux pièces chaudronnées à la main. En cours de travail on opère des recuits aux endroits voulus ou sur toute la pièce, soit au chalumeau oxyacétylénique, soit au feu de forge.

LE RECUIT DES MÉTAUX NON FERREUX

Le recuit des métaux non ferreux a pour but de faire disparaître les effets de l'écrouissage laissés par le laminage ou le chaudronnage.

Cuivre. Chauffer à 650° (rouge sombre) et refroidir dans l'eau.

Laiton. Chauffer à 500-550° (rouge sombre) et laisser refroidir à l'air libre.

Aluminium. Chauffer à 400° puis refroidir dans l'eau.

Duralumin. Chauffer à 400° puis laisser refroidir lentement.

Cette température ne donne à l'aluminium ou au duralumin ni couleur ni éclat. Elle est jugée par observation des taches d'huile ou des traits de savon de Marseille laissés volontairement sur les pièces avant chauffage et qui prennent une teinte brune lorsque la température de 400° est atteinte.

LE VIEILLISSEMENT

A. VIEILLISSEMENT DES PIÈCES MOULÉES

Les pièces moulées (volants, bâtis de machines...) présentent des tensions internes dues au refroidissement trop rapide et irrégulier des masses inégales (fig. 82). Ces

tensions s'atténuent petit à petit avec le temps puis disparaissent sous l'effet d'une lente transformation dite **vieillissement naturel.**

Mais, au cours du vieillissement, le nouvel état d'équilibre entraîne des déformations qui détruiraient l'état géométrique des surfaces usinées aussitôt après moulage. C'est la raison pour laquelle les pièces venues de fonderie ne sont usinées qu'après une année de vieillissement dans des parcs non couverts.

Le vieillissement peut être accéléré par un maintien à température légèrement inférieure à 200° pendant quelques jours. Ce **vieillissement artificiel** doit cependant être suivi d'un vieillissement naturel de trois mois environ.

B. VIEILLISSEMENT DES PIÈCES FORGÉES ET USINÉES

Nous avons déjà parlé du vieillissement des cales étalons avant rectification et avant rodage. Toutes les pièces qui doivent être usinées avec précision subissent le même traitement. Les calibres à limites par exemple sont vieillis en étuve après estampage et après rectification. Ils ne sont rodés que lorsque l'équilibre moléculaire a été parfaitement rétabli.

LE REVENU

I. — BUT DU REVENU

Le revenu s'applique seulement aux métaux trempés.

Il a pour but principal de **diminuer la fragilité des aciers trempés.** Cependant, toutes les propriétés mécaniques se trouvent en même temps modifiées par le revenu dans le même sens que par le recuit mais dans des limites beaucoup plus restreintes.

II. — PRATIQUE DU REVENU

Le diagramme du revenu (fig. 83) indique les phases successives du traitement.

— **oa** : chauffage au-dessous du point de transformation A_{3c} ;

— **ab** : température constante pour permettre un échauffement uniforme de la pièce ;

— **bc** : refroidissement assez lent.

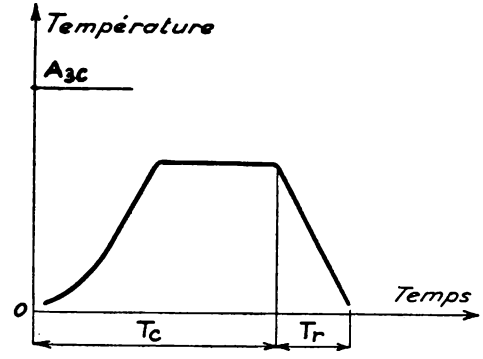


Fig 83 _ *Diagramme du revenu*
Le point A_{3c} n'est jamais atteint et $T_c > T_r$

A. CONDUITE DE LA CHAUFFE

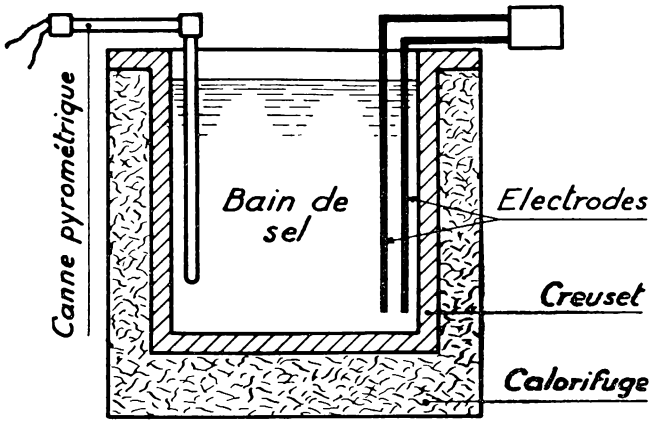


FIG 84_*Schéma d'un four électrique à bain de sel.*

Industriellement le chauffage se fait dans des fours à bain de sel.

Dans ces fours (fig. 84) la sole est remplacée par un creuset métallique (fonte ou acier inoxydable) dans lequel sont fondus les sels (nitrates, nitrites, chlorure de potassium ou de sodium), qui maintiennent les pièces à une température uniforme et qui les décapent.

Le contrôle de la température se fait à l'aide de la canne pyrométrique *Le Chatelier.*

Lorsque la température de revenu est supérieure à 300-350°, il faut prendre la précaution de faire *dégourdir* les pièces en les exposant quelque temps à la chaleur douce devant la porte du four.

B. CONDUITE DU REFROIDISSEMENT

Le chauffage n'ayant pas donné lieu à une transformation allotropique, la vitesse de refroidissement n'a pas d'influence sur le résultat de l'opération, quelle que soit la nature de l'acier.

Pour les aciers au carbone, si la température de revenu est inférieure à 300° on peut refroidir les pièces en les plongeant dans l'eau. Lorsque la température est supérieure à 300° le refroidissement doit se faire dans un bain d'huile chauffé à 150-200°, puis à l'air libre.

C. REVENU DES ACIERS RAPIDES

Cette opération, trop souvent négligée, fait acquérir aux aciers rapides une dureté et une ténacité supérieures à celles qui leur sont données par la trempe. Elle peut se faire dans des bains de plomb à 500-600°.

Ainsi, il est capital de noter que le revenu appliqué aux aciers rapides a un effet contraire à celui qu'il produit sur les autres aciers trempés.

COMPARAISON DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS THERMIQUES ET DE LEURS RÉSULTATS (fig. 85 et tableau nº 5).

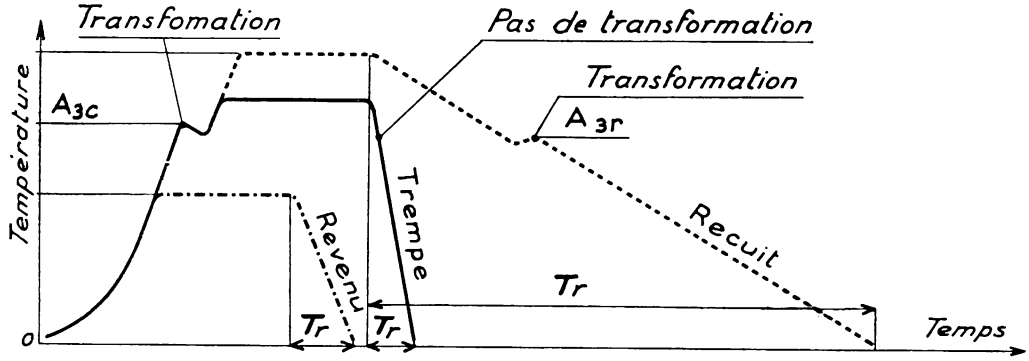


Fig 85 — *Comparaison de la conduite de la trempe, du recuit et du revenu. Observer attentivement la température de chauffage et la vitesse de refroidissement correspondant à chaque traitement*

Traitement thermique	Métal traité	Caractéristiques modifiées					
		Ténacité	Dureté	Limite élastique	Résilience	Allgt %	Striction
Trempe	Acier doux	Sans changement					
	Acier dur	↑	↑	↑	↓	↓	↓
Revenu	Acier dur trempé	↘	↘	↘	↖	↖	↖
Recuit	Acier dur	↓	↓	↓	↑	↑	↑
	Acier doux écroui						
	Cuivre						
	Laiton						
	Aluminium						

Tableau Nº 5 — *Les modifications des caractéristiques sont moins importantes pour les flèches obliques que pour les flèches verticales : augmentation pour les flèches vers le haut, diminution pour les flèches vers le bas.*

Résumé

LE RECUIT. Le recuit a pour but de redonner à un métal son état stable à froid et les propriétés mécaniques correspondant à cet état.

On distingue :

— le recuit d'adoucissement, destiné à faire disparaître les effets de la trempe;

— le recuit de régénération, pratiqué pour améliorer un métal surchauffé mais non brûlé;

— le recuit de stabilisation, opéré pour faire disparaître les effets de l'écrouissage;

Les propriétés sont modifiées dans les sens suivants :

— la dureté, la ténacité et la limite élastique diminuent;

— la résilience, l'allongement pour cent et la striction augmentent.

Le métal est chauffé au-dessus du point de transformation A_{3c}, maintenu à cette température puis refroidi lentement. Cette lenteur du refroidissement est nécessaire pour obtenir la transformation au point A_{3r}.

Industriellement, le recuit est opéré sur les pièces en acier trempé, sur les pièces moulées ou forgées, sur les pièces chaudronnées.

LE VIEILLISSEMENT. Le vieillissement, naturel ou artificiel, est pratiqué avant usinage des pièces moulées ou forgées ou avant rectification de pièces trempées afin d'éliminer leurs tensions internes.

LE REVENU. Le revenu s'applique seulement aux métaux trempés pour diminuer leur fragilité. Les propriétés mécaniques s'en trouvent modifiées en même temps dans le même sens que par le recuit mais moins sensiblement.

Le chauffage est maintenu toujours au-dessous du point A_{3c}. C'est pourquoi la vitesse de refroidissement n'a aucun effet sur le résultat final.

Le revenu pratiqué sur les aciers rapides augmente leur dureté et leur ténacité; c'est donc une opération indispensable après trempe.

LES TRAITEMENTS THERMIQUES (Suite)

LA CÉMENTATION

I. — PRINCIPE DE LA CÉMENTATION

Nous avons vu que le fer γ, ou l'acier contenant du fer γ, sont susceptibles de dissoudre du carbone. Par suite, si nous portons un acier à une température supérieure au point de transformation A_{3c} et si nous le mettons en présence de carbone, la surface extérieure de cet acier va se recharger de plus en plus en carbone. Nous obtiendrons donc, après retour à la température ambiante, une couche périphérique riche en carbone et susceptible de prendre la trempe et une âme intérieure, ou noyau, inchangée (fig. 86).

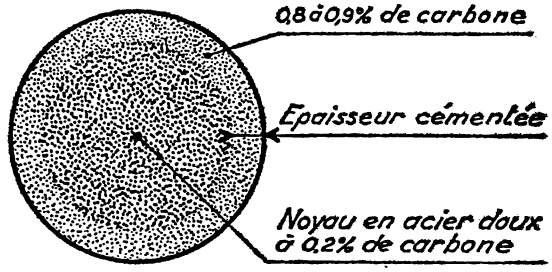


FIG 86 — *Coupe schématique d'une pièce cémentée*

Du point de vue chimique, le cément (corps riche en carbone) mis en présence du métal (généralement de l'acier ne contenant que de 0,2 à 0,3 % de carbone) et porté à 900-950°, donne avec l'oxygène de l'air de l'oxyde de carbone qui se diffuse dans le métal pour donner de l'austénite, constituant caractéristique à chaud des aciers durs au carbone. L'acier doux se trouve donc transformé en acier dur.

II. — BUT DE LA CÉMENTATION

La cémentation a donc pour but principal de carburer fortement l'extérieur de pièces mécaniques en acier doux et de leur **donner ensuite par la trempe** une grande dureté superficielle tandis que l'intérieur conserve sa résilience d'origine.

III. — VITESSE DE PÉNÉTRATION DU CARBONE

La vitesse de pénétration du cément varie avec trois facteurs : la température, la nature de l'acier et la nature du cément.

1° TEMPÉRATURE

Plus la température est élevée, plus la cémentation est rapide. Ainsi, quand on passe de 850 à 1 000°, la vitesse de diffusion du carbone triple; ce qui n'est d'ailleurs pas toujours un avantage car, après trempe, la couche cémentée rendue trop fragile risque de s'écailler.

2° NATURE DE L'ACIER

Les meilleurs aciers de cémentation sont les aciers à faible teneur en carbone (0,1 à 0,2 % de C).

Le manganèse et le silicium étant nuisibles à la cémentation, on ne doit pas en trouver respectivement plus de 0,8 % et 0,3 % dans les pièces à cémenter.

Le nickel retarde la cémentation, le chrome l'accélère et, finalement, les aciers nickel-chrome (Ni : 2 à 6 %) se cémentent le plus rapidement et donnent les meilleurs résultats.

3° NATURE DU CÉMENT

a) Céments solides. Les céments en poudre, tel le cément de *Caron* (60 % de charbon de bois, 40 % de carbonate de baryte) pénètrent de 0,1 *mm* à l'heure jusqu'à la profondeur de 1,2 *mm* puis de 2 *mm* en 24 heures seulement, soit 0,08 *mm* à l'heure.

Les céments granulés employés actuellement ont une vitesse de pénétration double : 0,2 *mm* à l'heure pendant les 10 premières heures, car les gaz circulent mieux à l'intérieur du cément.

Les céments organiques (poudres d'os, de corne, de cuir calcinés) ont une vitesse de pénétration de 0,4 *mm* à l'heure dans la première heure mais cette vitesse tombe rapidement et on ne peut pas les employer pour une cémentation profonde.

b) Céments liquides. Les bains, constitués par fusion de mélange de sels (cyanure de sodium, chlorure de sodium et carbonate de sodium) donnent une couche carburée de 0,4 *mm* pendant la première heure puis la profondeur cémentée augmente très lentement.

Certains bains, également obtenus par fusion, contiennent en suspension du carbone extrêmement divisé; ils affectent une profondeur de 0,5 *mm* après trois quarts d'heure de cémentation et de 2 *mm* après 6 heures. Actuellement ce dernier cément liquide est très employé et donne de bons résultats sur les aciers nickel-chrome.

c) Céments gazeux. Le seul pratiquement utilisé est l'acétylène mais on emploie aussi l'oxyde de carbone, le gaz d'éclairage ou des vapeurs d'hydro-carbures.

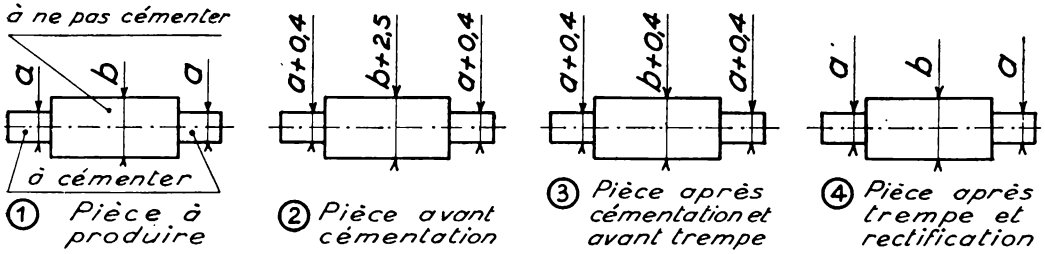
IV. — RÉSERVES DE CÉMENTATION

Lorsque les pièces ne doivent pas être cémentées entièrement (filetage, goupillage ou autres usinages à faire après trempe) il faut laisser des **réserves de cémentation,** c'est-à-dire protéger les parties qui ne doivent pas subir la cémentation.

Deux procédés peuvent être employés.

A. PROCÉDÉ PAR SURÉPAISSEURS

Sur les parties qui ne doivent pas conserver la cémentation (fig. 87 — I) on laisse des surépaisseurs plus fortes que l'épaisseur de cémentation (2). Après cémentation on enlève à l'outil de coupe la couche cémentée non encore trempée en laissant le métal nécessaire à l'usinage ultérieur s'il y a lieu (3) puis, après trempe et revenu, on rectifie pour mise aux cotes finales (4).



① Pièce à produire ② Pièce avant cémentation ③ Pièce après cémentation et avant trempe ④ Pièce après trempe et rectification

Fig 87 — *Fabrication d'une pièce présentant des réserves de cémentation par surépaisseur.*

Ce procédé n'est à employer que si les parties non cémentées sont peu étendues et d'un usinage facile.

B. PROCÉDÉS PAR PROTECTION

Les pièces sont ébauchées à des cotes majorées des surépaisseurs nécessaires à la rectification. Les parties à ne pas cémenter sont protégées par des enduits ou par dépôt électrolytique.

— **Protection par enduit.** Les parties à protéger sont recouvertes, sur une épaisseur de 1 *mm*, d'une pâte composée de $\frac{1}{3}$ de poudre d'amiante et de $\frac{2}{3}$ de silicate de soude, ou, sur une épaisseur de 2 *mm* de $\frac{1}{3}$ d'alumine et de $\frac{2}{3}$ de silicate de soude.

— **Protection par dépôt électrolytique.** Les pièces ébauchées sont plongées dans un bain de sulfate de cuivre dans le cas de cémentation solide ou de sulfate de chrome dans le cas de cémentation liquide (fig. 88). Cette distinction est justifiée par la composition différente des céments.

Le passage du courant dans le bain a pour effet de recouvrir les pièces d'une mince couche de cuivre ou de chrome (0,01 à 0,02 *mm* d'épaisseur) qui empêche la cémentation.

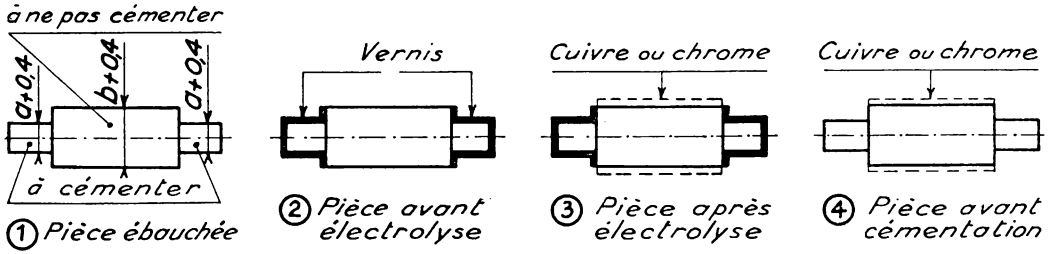


FIG 88 — *Préparation de pièce devant présenter des réserves de cémentation obtenues par dépôt électrolytique*

Il faut évidemment empêcher le recouvrement électrolytique des parties à cémenter. Pour cela on les enduit d'un vernis à base de cire, de résine et de paraffine qu'on enlèvera avant la cémentation.

V. — PROCÉDÉS DE CÉMENTATION

A. CÉMENTATION SOLIDE

Les pièces à cémenter et le cément sont mis dans des caisses métalliques, le plus souvent en fonte (fig. 89).

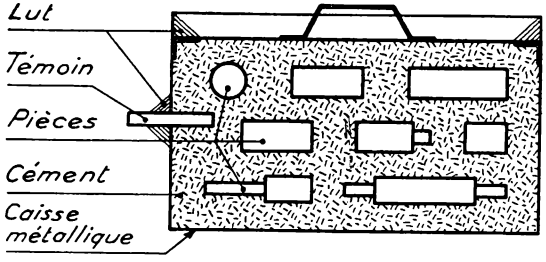


FIG 89 — *Caisse de cémentation chargée*

Les caisses sont préparées en plaçant d'abord un lit de cément de 4 à 5 *cm* puis des pièces séparées de 4 à 5 *cm*, un nouveau lit de cément et de pièces, et ainsi de suite de façon à terminer par une couche de cément. Le couvercle est luté à l'argile pour éviter toute entrée d'air.

Les caisses ainsi chargées sont placées dans des fours maintenus à la température convenable. La durée de l'opération dépend de la profondeur de cémentation désirée. Il faut la majorer du temps de mise à température préalable de la caisse et de son contenu.

Un **témoin** permettra ultérieurement la vérification de la cémentation et un pyromètre assure le contrôle de la température du four.

On laisse les pièces refroidir dans les caisses, soit dans le four éteint, soit au-dehors.

Remarque. La cémentation au feu de forge à l'aide de prussiate ou de poudres spéciales donne une couche cémentée de quelques centièmes de millimètre et ne peut remplacer, en aucun cas, la cémentation en caisse.

B. CÉMENTATION LIQUIDE

Elle se rapporte à deux procédés : la **cyanuration** et la **cémentation liquide** proprement dite.

— **Cyanuration.** Il y a cyanuration lorsque les sels fondants contiennent du cyanure de sodium.

Les pièces, bien sèches afin d'éviter toute projection, sont plongées dans le bain chauffé à 850-950°, y restent le temps nécessaire pour obtenir la profondeur de cémentation désirée, et sont ensuite retirées et refroidies librement.

— **Cémentation liquide proprement dite.** Pour la cémentation liquide, le bain contenant le carbone en suspension est chauffé à 875° pour les aciers au nickel-chrome et à 925° pour les aciers doux au carbone.

Les pièces, bien sèches, sont maintenues par des barres ou des fils d'attache (fig. 90).

La fluidité du cément assure l'uniformité de la température et de la cémentation.

Après cémentation les pièces refroidissent lentement.

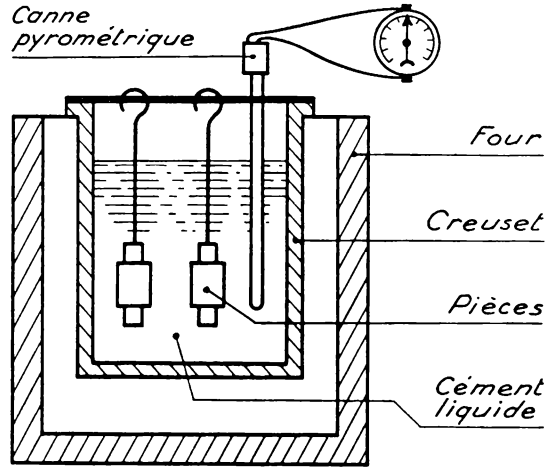


FIG 90_ *Schéma d'installation d'un bain de cémentation*

C. CÉMENTATION GAZEUSE

La cémentation gazeuse ne se pratique guère que sur des zones très localisées de pièces à l'aide du chalumeau oxyacétylénique réglé, après chauffe, avec excès d'acétylène.

Résumé

La cémentation a pour but de carburer fortement l'extérieur des pièces en acier doux. La trempe qui lui fait suite obligatoirement leur donne donc une grande dureté superficielle tandis que le noyau conserve une bonne résilience.

PRINCIPE DE LA CÉMENTATION. Les pièces en acier doux, entourées de cément et placées dans des milieux étanches, sont chauffées au-dessus du point de transformation A_{3c}. Le carbone du cément est alors dissous par la couche extérieure de l'acier doux qui se transforme ainsi en acier dur.

VITESSE DE PÉNÉTRATION DU CARBONE. Elle dépend de la température, de la nature de l'acier et de la nature du cément.

- **une température élevée donne une pénétration rapide mais une couche cémentée fragile ;**
- **les meilleurs aciers de cémentation sont les aciers à faible teneur en carbone (0,2 %) ou les aciers nickel-chrome (2 à 6 % de nickel) ;**
- **les céments solides granulés ont une vitesse de pénétration régulière de 0,2 *mm* à l'heure pendant plusieurs heures. Les céments liquides donnent une cémentation de 0,4 à 0,5 *mm* pendant la première heure mais la vitesse de pénétration diminue ensuite rapidement.**

RÉSERVES DE CÉMENTATION. Elles préservent de la cémentation certaines parties de pièces. On les obtient par enlèvement, avant trempe, de surépaisseurs cémentées ou par protection contre la cémentation au moyen d'enduits ou de dépôts électrolytiques.

PROCÉDÉS DE CÉMENTATION. La cémentation solide consiste à chauffer les pièces mises dans des caisses étanches contenant du cément. Après cémentation les pièces refroidissent lentement dans les caisses.

La cémentation liquide est réalisée par immersion prolongée des pièces dans des bains cémentants et refroidissement libre.

La cémentation gazeuse s'effectue surtout localement par excès d'acétylène au chalumeau oxyacétylénique.

SEIZIÈME LEÇON

LES TRAITEMENTS THERMIQUES (Suite)

LA CÉMENTATION (Fin)

VI. — ACCIDENTS DE CÉMENTATION

Les principaux sont :

A. INSUFFISANCE DE DURETÉ SUPERFICIELLE

Elle peut provenir :

— d'une température de cémentation insuffisante (carbone non dissous);
— de la mauvaise qualité du cément ou de son épuisement;
— d'une décarburation des pièces pendant le refroidissement qui suit la cémentation lorsqu'elles sont sorties trop chaudes des caisses.

B. INSUFFISANCE DE PROFONDEUR

L'insuffisance de profondeur peut avoir pour causes :

— l'emploi d'un cément trop énergique mais s'usant rapidement;
— le manque d'étanchéité des caisses laissant fuir les gaz cémentants.

C. IRRÉGULARITÉ DE LA COUCHE CÉMENTÉE

Dans une même caisse, un même cément peut donner une irrégularité de cémentation (points mous) par suite :

— d'impuretés locales du métal ou de plaques de rouille à sa surface;
— du contact des pièces avec des impuretés contenues dans le cément (écailles de calamine, morceaux de terre à luter);
— d'une insuffisance de circulation des gaz dans les céments en poudre.

D'une caisse de cémentation à une autre, la répartition irrégulière de chaleur dans le four, des céments usés ou non homogènes sont aussi des causes d'une irrégularité de cémentation.

D. FRAGILITÉ DES PIÈCES

Une fragilité anormale des pièces peut avoir pour causes :

— une cémentation à trop haute température (âme surchauffée);
— l'emploi de céments trop brusques (la couche cémentée n'est pas liée au noyau, elle s'écaille).

Remarque. Les accidents causés par la cémentation liquide sont moins fréquents parce que la température est plus régulièrement répartie dans les bains que dans les caisses.

VII. — TREMPE ET REVENU APRÈS CÉMENTATION

Une pièce cémentée se compose en réalité de deux aciers : acier doux dans le noyau avec point de transformation A_{3c} voisin de 900°, et acier dur en surface avec point de transformation A_{3c} voisin de 720°.

Si l'on recherche seulement une surface très dure sur des pièces supportant de faibles efforts (pièces frottantes, glissières, guides...) la trempe à 750° suffit.

Si les pièces doivent avoir une bonne ténacité (axes, pignons...) il faut régénérer l'âme qui a été surchauffée pendant la cémentation. On fait donc une première trempe à 925° qui donne un grain plus fin à l'âme mais aussi une trop grande fragilité à la couche cémentée. Il est donc nécessaire de faire une deuxième trempe à une température inférieure à 925° mais supérieure à 720°, c'est-à-dire à 750° environ.

Après trempe, un revenu à 175° atténue les tensions internes et diminue la fragilité de la couche cémentée.

En résumé, une double trempe suivie d'un revenu donne aux pièces cémentées les meilleures qualités mécaniques.

VIII. — CONTROLE DE LA DURETÉ DES PIÈCES CÉMENTÉES

Le contrôle par la méthode *Brinell* est impossible car la bille, soumise à un effort de pénétration important, déformerait la couche cémentée.

Pour obtenir une mesure exacte de la dureté de cette couche on utilise le microduromètre et la machine *Rockwell* spéciale dont les faibles charges respectives — 5 et 10 *kg* — sont adaptées à des épaisseurs de 0,1 à 0,2 *mm*.

IX. — APPLICATIONS DE LA CÉMENTATION

Toutes les pièces soumises au frottement voient leur usure réduite par la cémentation et, de plus, la résilience de leur noyau leur conserve une bonne résistance aux chocs.

La cémentation solide est appliquée aux pièces recevant des efforts importants ou des chocs (arbres à cames, leviers, engrenages, arbres porte-fraises...).

La cémentation liquide est réservée aux pièces de forme délicate (appareils de mesure, pièces de machines à coudre, de machines à écrire...).

I. — PRINCIPE ET BUT DE LA NITRURATION

A la température de 550° et au contact du fer, le gaz ammoniac libère son azote qui forme, avec le fer, du **nitrure de fer,** corps extrêmement dur mais fragile.

Il s'ensuit que le durcissement des pièces en acier peut être obtenu par nitruration et sans avoir recours à la trempe.

II. — ACIERS POUR NITRURATION

Les aciers au carbone se nitrurent très rapidement et à cœur, ce qui a pour effet de rendre les pièces fragiles. Ils ne peuvent donc être employés.

Les aciers spéciaux à l'aluminium (1,5 %) se nitrurent moins rapidement et le nitrure de fer se concentre sur une faible épaisseur, donc de grande dureté, en laissant aux pièces un noyau très résilient.

L'addition de nickel (1,5 %) et de molybdène (0,5 %) diminue les risques d'écaillage des parties nitrurées et augmente la résilience du noyau.

La nitruration s'applique également aux aciers inoxydables au nickel-chrome.

Avant nitruration les pièces sont ébauchées, trempées à l'huile puis revenues à 550° et ensuite usinées aux cotes exactes ou avec une surépaisseur de 0,1 *mm* pour rectification. La trempe et le revenu avant nitruration ont pour but de donner au métal d'origine, les caractéristiques mécaniques maxima correspondant à sa nature.

Remarque. Certaines fontes à l'aluminium et au chrome peuvent être nitrurées. La trempe et le revenu préalables leur font acquérir un grain plus fin et une structure plus homogène à l'origine d'une nitruration plus dure et plus tenace.

III. — VITESSE DE PÉNÉTRATION

Une couche nitrurée de 0,5 *mm* est généralement suffisante et nécessite une durée de traitement de 70 heures environ.

IV. — RÉSERVES DE NITRURATION

Les parties à préserver de la nitruration sont étamées, soit au fer à souder, soit par immersion dans un bain d'étain, soit par enduit composé de poudre d'étain et de silicate de soude.

Pour éviter la fusion de l'étain (230°) au cours de la chauffe, on expose les pièces étamées à l'air lorsqu'elles sont à 220° et cela pendant quelques minutes. L'oxydation de l'étain le rend infusible à 550° et la nitruration peut alors se poursuivre.

V. — PRATIQUE DE LA NITRURATION

Les pièces sont placées sur des grilles (fig. 91) contenues dans des caisses métalliques étanches où circule le gaz ammoniac.

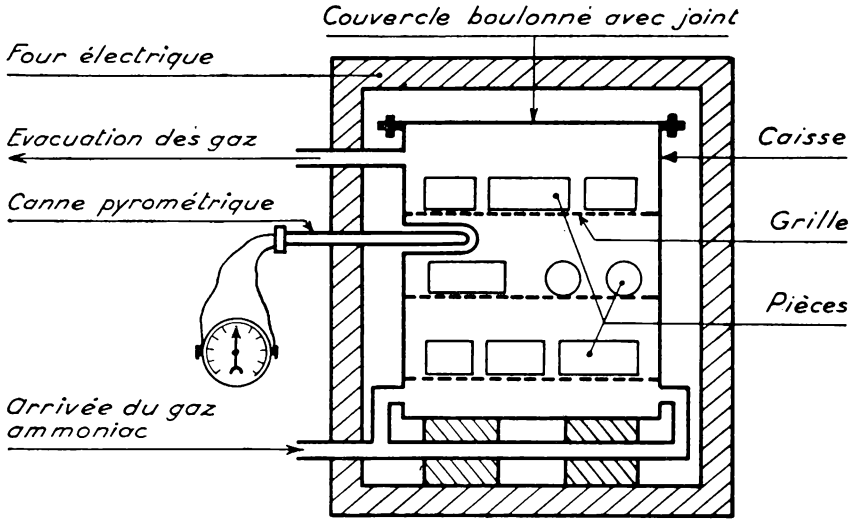


Fig 91 — *Schéma d'une installation de nitruration.*

Les caisses sont chauffées dans des fours électriques assurant une température régulière pendant toute la durée du traitement (70 *h*). La chauffe doit être rapide.

Le refroidissement se fait dans les caisses après arrêt de circulation du gaz.

Les caisses, les grilles et la tuyauterie sont en acier à forte teneur de nickel et de chrome pour éviter la dissociation du gaz ammoniac par les métaux ordinaires.

VI. — AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA NITRURATION

La nitruration procure :

— une dureté plus grande que la trempe ; une arête vive nitrurée raye le verre ;
— un durcissement sans trempe, ce qui élimine les déformations et les tapures et conserve aux pièces une haute résilience ;
— une dureté ne subissant pas l'effet du revenu jusqu'à 500° alors que la dureté des aciers au carbone diminue à partir de 200°. Le manque de graissage momentané ne provoque donc pas toujours le grippage des pièces nitrurées.

A ces avantages s'opposent les inconvénients suivants :

— la nitruration ne peut s'appliquer qu'à des aciers spéciaux coûteux;

— la couche nitrurée, très fragile, ne supporte pas les chocs directs;

— l'opération est longue et onéreuse.

VII. — APPLICATIONS DE LA NITRURATION

Les pièces nitrurées peuvent supporter des frottements sous fortes charges mais exemptes de chocs : cages de roulements, galets, chemises de cylindre, appareils de mesure, canons de perçage...

Résumé

ACCIDENTS DE CÉMENTATION. Les accidents de cémentation peuvent être nombreux si l'opération n'est pas conduite soigneusement.

Les principaux sont : l'insuffisance de dureté superficielle, l'insuffisance de profondeur, l'irrégularité de la couche cémentée, la fragilité de la couche cémentée.

TREMPE ET REVENU APRÈS CÉMENTATION. Après cémentation, les pièces sont trempées et revenues pour diminuer la fragilité de la couche cémentée.

Les meilleurs résultats sont obtenus par la double trempe.

LA NITRURATION

La nitruration est un procédé de durcissement superficiel de pièces en aciers spéciaux.

Elle est obtenue en chauffant les pièces à 550° dans des caisses étanches où circule du gaz ammoniac. L'azote du gaz ammoniac se combine au fer de l'acier pour donner un corps très dur, le nitrure de fer. Il n'est donc pas nécessaire de tremper les pièces.

La nitruration ne s'applique correctement qu'aux aciers spéciaux à l'aluminium contenant en plus de petites quantités de nickel, de chrome et de molybdène ou aux fontes de nitruration contenant également de l'aluminium et du chrome.

La protection contre la nitruration est obtenue par étamage puis par oxydation de la couche d'étain.

La nitruration assure :

— une dureté plus grande que la trempe;

— un durcissement sans trempe, ce qui élimine les déformations et les tapures;

Malheureusement ce procédé est long et coûteux et ne s'applique qu'à des aciers spéciaux.

PROTECTION DES MÉTAUX CONTRE LA CORROSION

GÉNÉRALITÉS

Tous les métaux usuels subissent la corrosion lorsqu'ils sont exposés nus à l'air atmosphérique. Seuls l'or et le platine sont inaltérables.

La perte d'ouvrages métalliques, corrodés par les divers agents atmosphériques, est considérable. Il est donc de toute nécessité de protéger les métaux contre la corrosion pour éviter cette perte et pour conserver à toute construction métallique sa résistance initiale.

I. — CAUSES DE LA CORROSION DES MÉTAUX

L'air, en plus de ses constituants (oxygène et azote), contient de la vapeur d'eau et des vapeurs acides ou salines (anhydrides carbonique ou sulfureux, hydrogène sulfuré...) L'action de l'oxygène et de ces vapeurs, qui attaquent les métaux, se manifeste par la formation d'oxydes, de carbonates, de sulfures, qui constituent les **rouilles.**

Ces rouilles ont des teintes caractéristiques : rouge brun pour le fer, bleu vert pour le cuivre, le laiton et le bronze (vert-de-gris), gris pour le plomb, l'étain et le zinc, blanc gris pour l'aluminium.

Si la première couche de rouille est compacte et imperméable, elle constitue une enveloppe protectrice qui isole le métal sain du milieu ambiant et la corrosion ne peut se continuer. C'est le cas des rouilles du zinc, du plomb, de l'étain, de l'aluminium, du cuivre, du nickel, du chrome, du cadmium.

Au contraire, si la couche est poreuse, l'air la traverse, continue son action corrodante et le métal est rongé dans toute sa masse. Il en est ainsi de la rouille du fer.

II. — FACTEURS FAVORISANT LA CORROSION

A. TENEUR DU MILIEU AMBIANT

La vitesse de corrosion est fonction de la teneur de l'air en vapeur d'eau et en vapeurs salines ou acides. Ceci explique l'oxydation et la destruction relativement rapides d'un métal ferreux exposé au bord de la mer.

B. ÉTAT DE SURFACE

Plus la surface est rugueuse, plus rapide est la corrosion. Telle est la raison d'une meilleure conservation des pièces polies.

C. HÉTÉROGÉNÉITÉ DU MÉTAL

Plus l'hétérogénéité du métal est grande, plus l'altération est rapide. Ainsi les soudures favorisent-elles l'apparition de la rouille.

III. — MOYENS DE PROTECTION

Pour construire des organes résistant à la corrosion on peut :

A. UTILISER UN MÉTAL OU UN ALLIAGE RÉSISTANT A LA CORROSION

1° **Métal pur.** Citons principalement l'aluminium, le zinc, le cuivre, l'étain et le plomb. Mais aucun de ces métaux ne peut être utilisé pour des pièces mécaniques, leur dureté et leur ténacité étant insuffisantes.

2° **Alliage.** Les principaux sont le bronze, le laiton, les aciers spéciaux dits inoxydables, au chrome, au nickel ou au nickel-chrome.

Mais ici encore ces différents alliages ne sont pas toujours acceptables et lorsqu'ils le sont, ils élèvent le prix de la construction.

B. UTILISER UN ALLIAGE ALTÉRABLE ISOLÉ DU MILIEU AMBIANT

C'est le cas le plus appliqué. Les organes sont construits en alliages ferreux et sont protégés par métallisation, par peinture et vernis, par émaillage ou par modification de la couche superficielle du métal.

TRAITEMENT DES PIÈCES

Le traitement des pièces comprend deux phases bien distinctes : la préparation et la protection.

I. — PRÉPARATION DES PIÈCES

La préparation des pièces consiste à mettre le métal à nu afin que la couche protectrice isole un métal sain.

Cette préparation peut nécessiter les opérations suivantes :

A. POLISSAGE

Le but du polissage est de faire disparaître les traces d'usinage ou d'emboutissage.

Il se fait à l'aide d'abrasifs en grains de plus en plus fins collés sur des disques en bois ou en feutre tournant très vite. La finition a lieu sur des polissoirs constitués par des

disques en toile (calicot) serrés en paquet sur un arbre tournant rapidement. Les disques sont enduits d'une composition (poudre abrasive mélangée à de la stéarine ou à de la paraffine).

Les grosses pièces sont polies au moyen de machines portatives.

Les petites pièces sont polies dans un tonneau tournant lentement et contenant des billes en acier et de la poudre abrasive.

Les pièces en aluminium et en alliages d'aluminium sont polies par enlèvement superficiel électrolytique : l'opération est appelée **brillantage.**

B. DÉGRAISSAGE

L'élimination des corps gras peut être obtenue :

a) Par dissolution. Les pièces sont plongées dans un solvant : essence, benzine, trichloréthylène.

Le trichloréthylène, principalement utilisé, est chauffé à 60°. Lorsque le bain est usé, on récupère le solvant par distillation qui le sépare des corps gras.

b) Par saponification. Les pièces sont immergées dans une solution de soude caustique à 10 % chauffée à 100°. Les corps gras d'origine animale ou végétale sont transformés en savon qui se dissout dans le bain.

c) Par émulsion. Les corps gras d'origine minérale n'étant pas saponifiables, on traite les pièces par électrolyse. L'électrolyte contient de la soude caustique, du carbonate de sodium et du cyanure de sodium. Les pièces sont à l'anode (+), la cathode (—) étant du nickel ou du charbon des cornues.

On peut ajouter au bain du cyanure de cuivre afin de contrôler l'opération. Lorsque les pièces sont cuivrées, le dégraissage est terminé. On rince ensuite à l'eau froide.

C. DÉCAPAGE

Il a pour but l'élimination des oxydes.

a) Décapage chimique. Dans un bain sulfurique ou chlorhydrique à 10 % et chauffé à 70° on immerge les pièces. Les oxydes sont détachés et le métal est alors attaqué ; il s'ensuit une grande production d'hydrogène qui, absorbé par le métal, le rend fragile.

Il est donc indispensable d'ajouter au bain des **limiteurs de décapage** (colle, amidon, goudron...) qui donnent des colloïdes. Ceux-ci se déposent sur le métal et en ralentissent l'attaque.

b) Décapage mécanique. Les pièces reçoivent un jet d'air comprimé entraînant avec lui du sable (grains de silice) ou de la grenaille d'acier trempé.

L'ouvrier travaille en chambre close. Il porte un masque et une tenue spéciale qui le protège des poussières.

Des rinçages à l'eau froide suivent le décapage, qu'il soit chimique ou mécanique.

II. — PROTECTION DES PIÈCES

A. PROTECTION PAR MÉTALLISATION

La métallisation consiste à recouvrir le métal à protéger d'un autre métal dont la rouille est protectrice.

a) Métallisation par immersion. Les pièces, dégraissées et décapées, sont plongées dans des bains de métal en fusion. Deux immersions assurent un recouvrement parfait. A la sortie du bain, un essuyage régularise l'épaisseur de la couche protectrice.

Le procédé s'appelle **galvanisation** (zinc), ou **étamage** (étain), ou **plombage** (plomb) et est appliqué pour la protection des boîtes de conserve, des ustensiles de cuisine, du fil de fer et des grillages...

b) Métallisation par électrolyse (fig. 92). Un sel du métal à déposer est en solution dans l'eau où plongent les pièces qui constituent la cathode (—). Les anodes (+) sont massives et de même nature que le métal à déposer.

Dans le cuivrage par exemple, sous l'effet du courant électrique, le cuivre de la solution se dépose sur les pièces tandis que les anodes attaquées régénèrent le bain. Pour assurer un dépôt régulier on place les pièces entre deux anodes.

On peut, par électrolyse, déposer les métaux ci-après : cuivre, zinc, étain, plomb, nickel, chrome, cadmium. Un premier dépôt, ou sous-couche, est parfois réalisé sur les pièces pour assurer une meilleure adhérence du dépôt final.

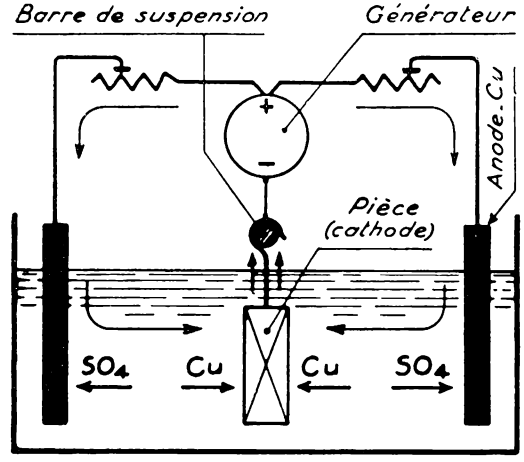


FIG 92 _ *Principe du cuivrage par électrolyse du sulfate de cuivre*

Ex. : Un cuivrage précède le nickelage, un cuivrage puis un nickelage précèdent le chromage de l'acier.

La métallisation par électrolyse se fait généralement sur des pièces polies préalablement dégraissées.

c) Métallisation par projection. Le métal protecteur est fondu dans un pistolet à chalumeau oxyacétylénique et à air comprimé qui pulvérise le métal en fusion en fines gouttelettes et le projette violemment contre la surface à protéger.

A la sortie du pistolet, les gouttelettes sont solidifiées et se soudent sur la pièce par suite de leur ramollissement provenant du choc.

Ce procédé s'appelle le **schoopage.**

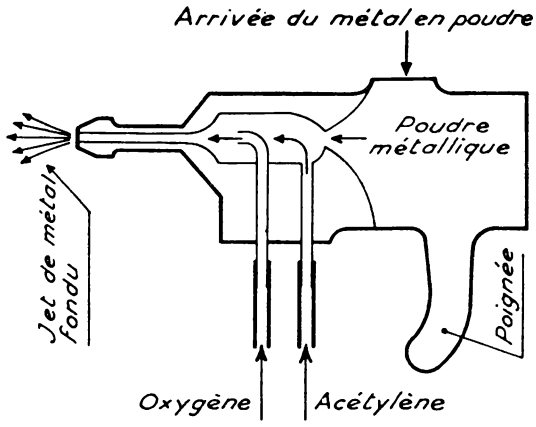


Fig 93 — *Schéma d'un pistolet pour métallisation*

Le métal arrive au pistolet en poudre ou en fil. Le zinc et l'aluminium sont très employés mais on peut projeter du plomb, de l'étain, du cuivre, du cadmium et des aciers inoxydables.

Avant schoopage les pièces sont dégraissées et décapées, ou polies et dégraissées.

d) Métallisation par substitution. L'opération est surtout un cuivrage. Les pièces en acier, dégraissées et décapées, sont plongées dans une solution de sulfate de cuivre. Il se produit une substitution et le cuivre se dépose immédiatement sur les pièces.

On procède ainsi pour cuivrer des pièces d'horlogerie ou d'appareillages électriques.

e) Métallisation par placage. Par laminage, on soude une mince bande de métal protecteur sur le métal à protéger.

Ex. : cuivre ou nickel sur acier, aluminium sur duralumin.

B. PROTECTION PAR PEINTURES ET VERNIS

Les peintures et les vernis sont des enduits liquides qui, après séchage, laissent un film protecteur sur les pièces auxquelles ils ont été appliqués. Les peintures laissent un film opaque, les vernis un film transparent.

Ces enduits contiennent :

— **des éléments filmogènes** qui donnent le film après séchage et lui assurent résistance et adhérence (huile de lin, résines naturelles et synthétiques, laques à la nitrocellulose, copals);

— **des éléments colorants,** constitués par des oxydes métalliques réduits en poudre très fine;

— **des éléments solvants** qui donnent à la peinture une fluidité permettant son application (essence de térébenthine, alcool butylique);

— **des éléments siccatifs** qui accélèrent le séchage et la résinification des éléments filmogènes.

Un résultat efficace est obtenu si, après dégraissage et décapage, et parfois polissage, les pièces ont reçu une première couche de minium (huile de lin et oxyde de plomb).

C. PROTECTION PAR ÉMAILLAGE

Les émaux sont des produits fusibles à base de kaolin et d'oxydes de plomb, d'étain, de titane.

Les pièces, décapées, reçoivent une première couche dite **couche contre-oxyde,** d'un enduit composé de borax et de quartz. Elles sont ensuite émaillées au pistolet ou par trempage puis, après séchage, cuites au four à 800-1 000°. A cette température, l'émail se vitrifie et constitue une couche protectrice très dure mais qui s'écaille facilement sous les chocs.

Ainsi sont protégés certains ustensiles de cuisine, des cuves pour produits chimiques.

D. PROTECTION PAR MODIFICATION SUPERFICIELLE DU MÉTAL A PROTÉGER

1° **Création d'un alliage superficiel.** Ce procédé est réservé aux fontes et aux aciers.

a) Shérardisation. Les pièces, dégraissées et décapées, sont mises en caisses métalliques avec un mélange de poudre de zinc, de sable et de corps réducteurs, et chauffées au four à 420° pendant une à deux heures. Les caisses, cylindriques, tournent lentement.

Les pièces se recouvrent d'un alliage gris qui protège le métal. On traite ainsi la boulonnerie, la clouterie, les ferrures pour installations de lignes électriques.

b) Calorisation. Les pièces, en caisse et entourées d'un mélange de poudre d'aluminium et de fer, sont chauffées à 1 000°. Il se forme une couche protectrice épaisse (1 *mm*) qui peut résister à une température de 900° (Protection des réchauffeurs, des récupérateurs de chaleur...).

2° **Modification chimique de la surface du métal.**

a) Phosphatation. Elle s'applique aux pièces d'acier qui, décapées, sont plongées dans une solution d'acide phosphorique et de sels de zinc. Il se forme sur les pièces une couche de phosphate de fer qui reçoit ensuite une application de vernis ou de peinture.

Ce procédé s'appelle **parkérisation** ou **bondérisation.**

b) Mordançage. C'est une oxydation qui se forme sur les alliages de magnésium. Elle est obtenue en plongeant les pièces dans une solution de bichromate d'ammonium dans l'acide nitrique chauffé à 100°.

Remarque importante. La bonne protection des métaux dépend certes de la qualité de la couche protectrice, mais aussi et surtout d'une bonne préparation des pièces. **Sans une préparation soignée, la couche protectrice s'écaille et finalement se détache assez rapidement.**

Résumé

Les métaux usuels en contact avec les divers agents atmosphériques se couvrent de rouille. Certaines rouilles sont protectrices de la masse, d'autres ne le sont pas : il faut alors protéger le métal pour éviter une altération totale.

Avant protection des pièces, il faut les préparer.

PRÉPARATION DES PIÈCES

Les pièces sont préparées afin qu'elles présentent des surfaces saines, parfois lisses, exemptes de tous corps étrangers.

Les opérations qui assurent cette préparation sont :

- **le polissage, à l'aide de disques abrasifs et de polissoirs ;**
- **le dégraissage, réalisé par dissolution, par saponification ou par émulsion des corps gras ;**
- **le décapage, chimique ou mécanique, qui élimine les oxydes et les corps adhérents.**

Une préparation soignée est indispensable à une bonne adhérence du dépôt protecteur.

PROTECTION DES PIÈCES

Protection par métallisation. **On recouvre les pièces d'un métal qui assure son auto-protection : c'est le cas de la galvanisation, de l'étamage, du nickelage, du chromage, du cadmiage, du placage, du schoopage.**

Protection par peintures et vernis. **Les peintures et vernis laissent sur les métaux un film inaltérable à l'air, coloré ou non, opaque ou transparent.**

La protection est plus efficace si les peintures sont déposées sur une couche de minium.

Protection par émaillage. **Les émaux sont des produits fusibles qui, déposés sur les pièces, se vitrifient à la cuisson. Ils constituent une gaine protectrice très dure mais qui s'écaille sous les chocs.**

Protection par modification superficielle. **Ainsi sont protégés les alliages ferreux par shérardisation, par calorisation ou par phosphatation.**

Le mordançage est une oxydation des alliages de magnésium qui joue le rôle de couche protectrice.

QUATRIÈME PARTIE

MÉTROLOGIE

Erreurs dues aux appareils.

Erreurs dues à l'opérateur.

Erreurs dues aux dilatations thermiques.

Élimination des erreurs.

Contrôle des vérificateurs à dimensions fixes.

MÉTROLOGIE

LES ERREURS DANS LES MESURES

L'imprécision (1) d'une mesure est l'erreur plus ou moins importante qui est commise lors de son évaluation. Cette erreur est la différence entre la cote lue et la cote réelle.

Ex. : Cote lue 50,02 *mm* ; cote réelle 50 *mm*.

Erreur = 50,02 — 50 = 0,02 *mm*. On dit que la précision de la mesure est de deux centièmes de millimètre.

Plus l'erreur est petite, plus la mesure est précise.

Pour un même appareil de mesure, une même pièce et un même opérateur, il n'y a jamais évaluation exacte absolue.

En effet :

— aucun appareil n'est parfait ;

— aucun opérateur ne peut garantir la parfaite exactitude de la lecture ;

— il peut y avoir déséquilibre de température entre la pièce et l'instrument.

ERREURS DUES AUX APPAREILS

Ces erreurs sont d'autant plus faibles que **la justesse, la fidélité** et **la sensibilité** de l'appareil sont plus grandes.

I. — LA JUSTESSE

La justesse est l'exactitude des intervalles de la graduation et de son origine.

Les défauts de justesse sont les écarts accusés par rapport à des dimensions connues.

Ex. : Lecture 80,03 *mm* correspondant à une mesure d'une cale étalon de 80.
Défaut de justesse : 80,03 — 80 = 0,03 *mm*.

Connaissant les écarts on peut corriger les défauts et établir la courbe de correction (Voir cours de 3e, quatrième leçon).

Les défauts de justesse se rapportant à l'origine de la graduation proviennent de la non-concordance des divisions zéro lorsque les faces de référence de l'instrument sont en contact.

Ex. : (fig. 94).

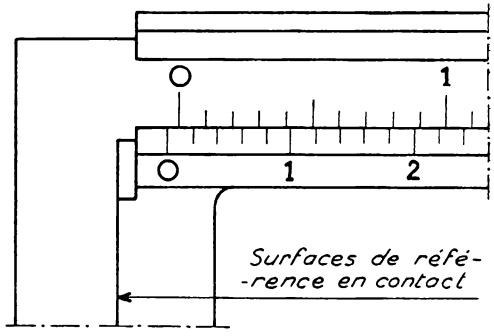


FIG 94 — *L'écart entre les divisions zéro est le défaut de justesse à l'origine de la graduation.*

(1) On pourrait aussi bien dire : La précision.

Ce défaut n'existe pas pour le comparateur à cadran car, à l'étalonnage, il est possible d'amener le zéro du cadran en concordance avec l'aiguille.

La justesse peut être affectée pour les causes suivantes.

A. VIEILLISSEMENT INCOMPLET AVANT GRADUATION

Le vieillissement engendre des modifications de forme et de dimensions. Tout instrument gradué et ajusté avant vieillissement complet (cas fréquent) voit donc sa justesse diminuée.

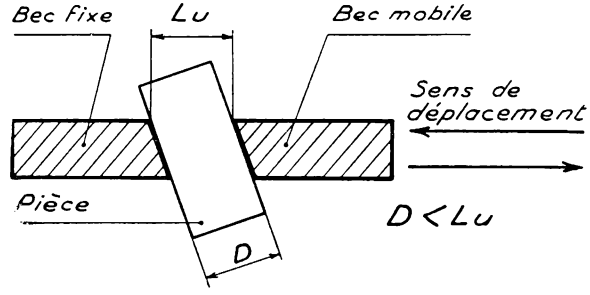


FIG 95 — *Voilage transversal des becs d'un pied à coulisse. (très exagéré)*

B. VOILAGE DES SURFACES DE RÉFÉRENCE

Des surfaces de référence sont voilées lorsqu'elles ne sont pas normales à leur sens de déplacement.

Ex. : La figure 95 montre des becs de pied à coulisse voilés transversalement. La cote réelle **D** est plus petite que la cote lue. Mais l'erreur **Lu — D** est constante.

Dans le micromètre, la rotation de la touche mobile est cause d'erreurs variables et périodiques (fig. 96).

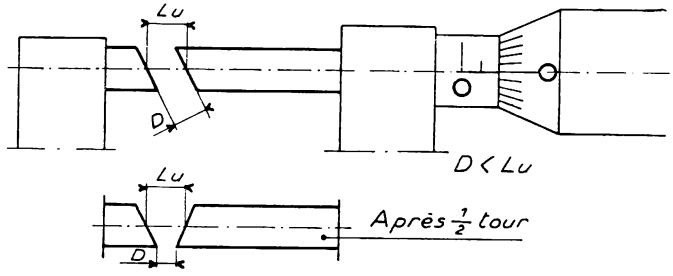


FIG 96 — *Voilage des surfaces de référence d'un micromètre. (très exagéré)*

C. DÉFAUT DE RECTITUDE

Un défaut de rectitude de la règle graduée du pied à coulisse affecte la justesse de l'instrument (fig. 97).

D. DÉFAUT DE TAILLAGE

Les défauts de taillage de la crémaillère et des pignons du comparateur à cadran sont également des causes d'erreurs dans les mesures et les contrôles.

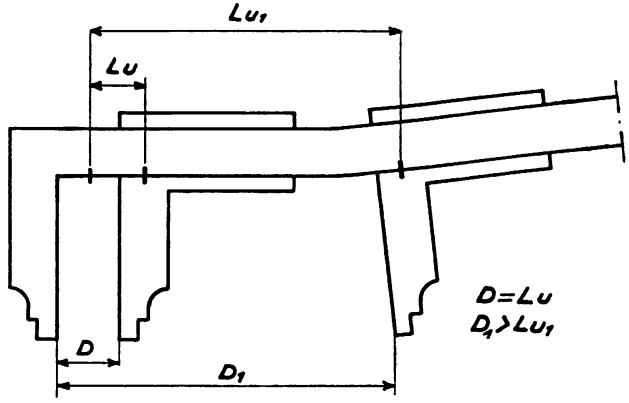


FIG 97 — *Défaut de rectitude de la règle du pied à coulisse. (très exagéré)*

II. — LA FIDÉLITÉ

Un appareil de mesure est fidèle lorsqu'il indique la même dimension dans les mêmes conditions d'emploi.

Un défaut de fidélité est cause d'incertitude dans la mesure.

Ex. : Si on lit successivement 50,02 - 50 - 49,99 - 50,01, il y a incertitude de mesure. Elle a pour valeur la différence entre la plus grande et la plus petite lecture, soit dans ce cas : 50,02 — 49,99 = 0,03 *mm*.

Les causes dues à l'appareil qui détruisent la fidélité sont principalement : le vieillissement, les jeux dans les articulations et les glissières, la variation de la pression de contact.

A. JEUX DANS LES ARTICULATIONS ET LES GLISSIÈRES

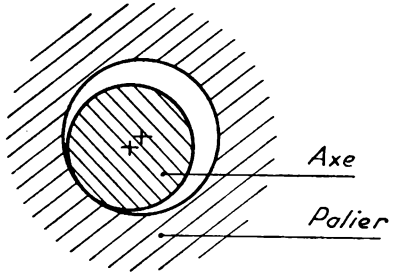


FIG 98 — *Par suite du jeu l'axe peut occuper des positions différentes dans son palier.*

S'il y a jeu dans une articulation autour d'un axe (fig. 98), l'organe mobile peut, à l'arrêt, occuper des positions différentes qui sont évidemment des causes d'incertitude.

On a avantage, le cas échéant, à remplacer ce système par des **couteaux** avec ressort de rappel à faible tension ou par des **axes à pivots** supportés par des **crapaudines** à rattrapage de jeu (fig. 99).

Les jeux dans les glissières engendrent les mêmes erreurs que les jeux précédents. Un **lardon** de rattrapage de jeu les élimine et régularise la pression de contact; c'est le cas du pied à coulisse.

B. PRESSION DE CONTACT

L'appareil de mesure porte souvent un limiteur de pression de contact qui ne fonctionne pas toujours au même point et donne lieu à une erreur de fidélité.

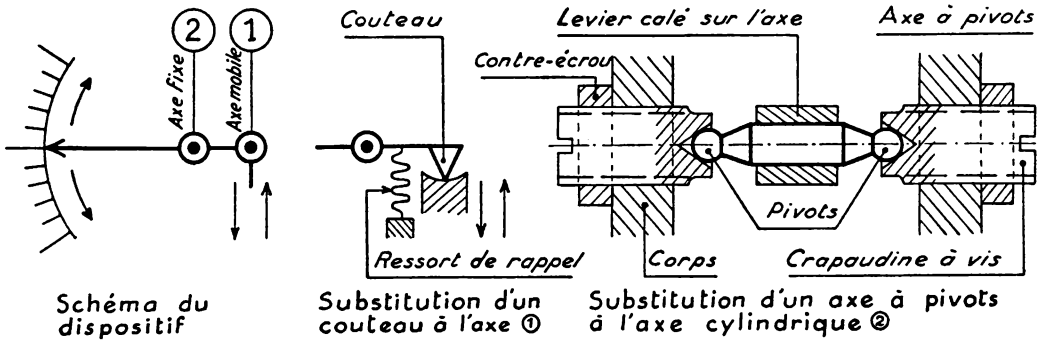


FIG 99 _ *Les couteaux et les axes à pivots assurent la suppression des jeux et augmentent la fidélité.*

III. — LA SENSIBILITÉ

Cette qualité est à la base du principe des appareils amplificateurs des écarts. Elle est égale au rapport $\frac{\mathbf{a}}{\mathbf{b}}$ du déplacement **a** de l'aiguille au déplacement **b** du palpeur (fig. 100).

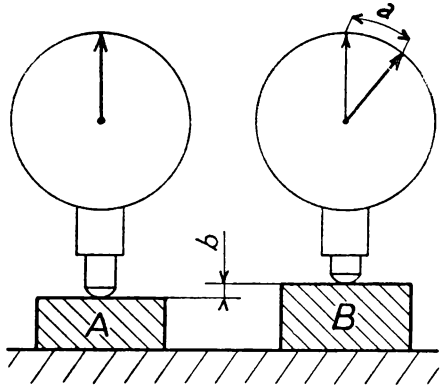


FIG 100 _ *La sensibilité de l'appareil est mesurée par le rapport* $\frac{a}{b}$.

Ce rapport de sensibilité est dit aussi **coefficient d'amplification.**

Ex. : Déplacement de l'aiguille mesuré par une division : 5 *mm*; déplacement du palpeur mesuré par l'écart entre deux étalons **A** et **B** : 0,005 *mm*.

Rapport de sensibilité $\frac{5}{0{,}005} = 1\,000.$

Ce nombre exprime le coefficient d'amplification de l'appareil. Il est généralement de 100, 1 000 et peut aller jusqu'à 20 000 pour des appareils opto-électriques.

Il faut remarquer que l'amplification n'améliore pas la justesse de l'amplificateur car son erreur propre subsiste.

ERREURS DUES A L'OPÉRATEUR

Sont imputables à l'opérateur les erreurs de lecture et les maladresses de manipulation.

I. — ERREURS DE LECTURE

Ce sont des erreurs d'appréciation de concordance des graduations, erreurs qui sont parfois causées par une mauvaise visée (fig. 101) et accentuées par le ressaut qui existe entre la surface graduée fixe et le vernier mobile.

Ces erreurs sont évitées par 'emploi de lunette de visée (1).

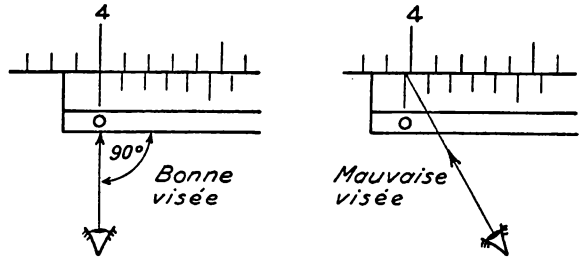


FIG 101 — *La cote 40 semble n'être pas atteinte sous la visée oblique, d'où erreur de lecture*

II. — ERREURS DUES AUX MALADRESSES DE MANIPULATION

A. ERREURS D'ORIENTATION DE L'APPAREIL

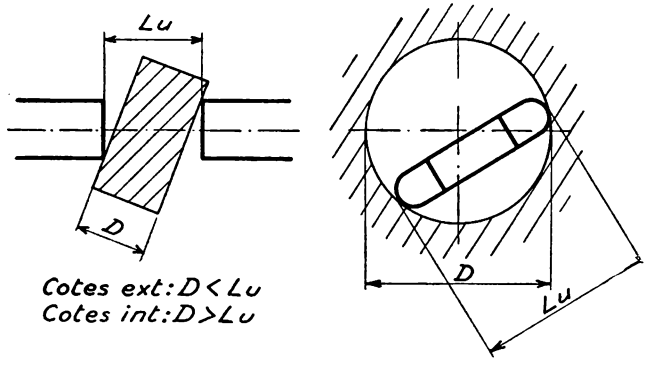


FIG 102 — *Erreurs de mesure provenant d'un alignement défectueux de l'instrument ou de la pièce.*

Elles majorent les cotes extérieures et diminuent les cotes intérieures (fig. 102).

L'erreur de mesure qui en résulte, toujours faible, n'est pratiquement pas appréciable.

B. ERREURS DUES A LA PRESSION DE CONTACT

Il y a toujours fléchissement des becs et des touches sous la pression de l'opérateur. Si cette pression diffère de la pression d'étalonnage, il en résulte une erreur de mesure.

C'est pourquoi on limite, quand c'est possible, cette pression à une valeur constante à l'aide d'une friction (micromètre), d'un ressort taré (comparateur à cadran), d'un amplificateur à aiguille (comparateur d'atelier). On l'annule même en supprimant le contact dans le cas du micromètre pneumatique *Solex*.

Lorsque la surface d'appui du palpeur est très faible, la pression de contact peut produire des écrasements. C'est le cas pour la broche à bouts sphériques ou pour le calibre à mâchoires enfoncés trop dur dans un alésage ou sur un arbre.

(1) Les appareils à lunette de visée sont étudiés en classe de 1re.

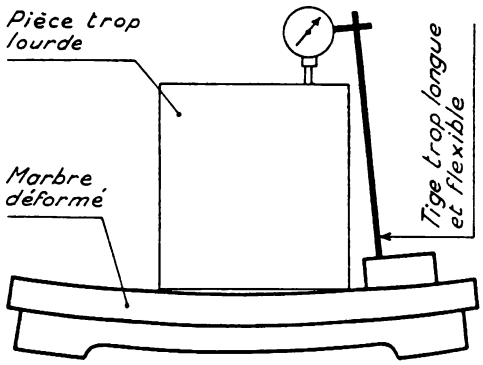


FIG 103 _ *Déformation amplifiée d'un marbre sous une surchage. L'étalonnage du comparateur est détruit par la flexion du marbre.*

III. — ERREURS DUES A LA DÉFORMATION DES SUPPORTS

Au cours d'une mesure par comparaison (fig. 103), si la pièce est trop lourde, il y a déformation du marbre et l'étalonnage préalable du comparateur est détruit par la flexion. Il en est de même si le marbre *boite* sur son support, c'est-à-dire si son appui n'est pas parfaitement assuré.

Enfin, si la tige portant le comparateur est trop longue et flexible, la mesure ne présente aucune fidélité.

Résumé

L'erreur d'une mesure est la différence entre la cote réelle et son évaluation.

ERREURS DUES AUX APPAREILS. Elles proviennent du manque de justesse, de fidélité et de sensibilité de l'appareil.

***La justesse* est l'exactitude des intervalles de la graduation et de son origine. L'étalonnage donne la valeur de la correction à opérer.**

La justesse peut être affectée par le vieillissement des matériaux constituant l'appareil, par le voilage des touches, par les défauts de rectitude ou de taillage.

***La fidélité* est la répétition identique d'une mesure dans les mêmes conditions d'emploi de l'instrument.**

Les jeux dans les glissières ou dans les axes sont des causes de manque de fidélité.

***La sensibilité* est particulière aux appareils amplificateurs. C'est le rapport $\frac{a}{b}$ du déplacement a de l'aiguille au déplacement b du palpeur, on l'appelle aussi coefficient d'amplification de l'appareil.**

ERREURS DUES A L'OPÉRATEUR. Ce sont :

***Les erreurs de lecture* qui proviennent d'une mauvaise appréciation de concordance des divisions;**

***Les erreurs dues aux maladresses de manipulation* telles que mauvaise orientation des touches ou des pièces, variations de la pression d'emploi, surcharge des bancs ou tables porte-pièces, flexibilité des supports.**

Les variations de la pression d'emploi sont très réduites par l'adjonction aux appareils d'un dispositif limiteur de pression.

MÉTROLOGIE (Suite)

ERREURS DUES AUX DILATATIONS THERMIQUES

Les instruments de mesure sont étalonnés à la température de **20° C, température de référence**, et la cotation des dessins suppose que les pièces doivent être mesurées à cette même température.

Or, les dimensions d'une pièce ou d'un instrument de mesure augmentent ou diminuent en fonction de la température : il y a dilatation ou contraction.

On conçoit donc que des erreurs accompagnent la mesure d'une cote lorsque la pièce et le vérificateur ne sont pas à la même température et qu'il soit nécessaire de corriger la lecture.

I. — RAPPEL DE NOTIONS DE PHYSIQUE

A. COEFFICIENT DE DILATATION LINÉAIRE

C'est le rapport λ (1) de l'augmentation de la longueur d'un corps, pour 1° C d'écart de température, à sa longueur à 0° C

$$\lambda = \frac{\text{allongement pour 1° C d'écart}}{\text{longueur à 0° C}}$$

Ce coefficient varie d'après la nature du matériau : acier : $\lambda = 0{,}000012 = 1{,}2 \times 10^{-5}$; laiton : $\lambda = 0{,}000018 = 1{,}8 \times 10^{-5}$; aluminium : $\lambda = 0{,}000023 = 2{,}3 \times 10^{-5}$.

B. CALCUL D'UNE DIMENSION EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

La dilatation d'un corps, ou accroissement de longueur Δ (2), est proportionnelle au coefficient de dilatation λ, à sa longueur initiale $\mathbf{L}_o$ à 0° et à la température $\mathbf{t}$°

$$\Delta_t = \mathbf{L}_o \times \lambda \times \mathbf{t}°$$

Désignant par $\mathbf{L}_o$ la longueur à 0°, $\mathbf{L}_T$ la longueur à $\mathbf{T}$°, $\mathbf{L}_t$ la longueur à $\mathbf{t}$° avec $\mathbf{T} > \mathbf{t}$, un calcul que nous ne reproduisons pas ici conduit aux deux relations suivantes :

$$\Delta_T \simeq \mathbf{L}_t . \lambda\ (T\text{-}t) \qquad (1)$$

$$\mathbf{L}_T \simeq \mathbf{L}_t [1 + \lambda\ (T\text{-}t)] \qquad (2)$$

Considérant une contraction comme une dilatation négative, le résultat négatif obtenu avec $\mathbf{T} < \mathbf{t}$ indiquera une contraction. Les relations (1) et (2) sont donc valables pour le calcul d'une dilatation ou d'une contraction.

---

(1) Lettre grecque minuscule qui se lit lambda.
(2) Lettre grecque majuscule qui se lit delta.

C. APPLICATIONS NUMÉRIQUES

1er Ex. : Une coupe d'acier a une longueur $L_o = 80$ *mm* à $t_o = 0°$. Quelle est sa longueur L_T à $T = 20°$?

La relation (2), qui est la relation générale, donne :

$L_T \simeq L_o\ [1 + \lambda\ (T - t_o)] \simeq 80\ (1 + 0{,}000012 \times (20 - 0)$ et enfin $L_T = 80{,}019$ *mm*.

2e Ex. : Une pièce en aluminium mesure 150 *mm* à 30°. Quelle est sa longueur à la température de 20°?

Appliquons la relation (2) :

$L_T \simeq L_t[1 + \lambda\ (T - t)] \simeq 150\ [1 + 0{,}000023\ (20 - 30)] \simeq 150 \times (1 - 0{,}00023) \simeq$
$150 \times 0{,}99977 = 149{,}9655$ *mm*.

Nous aurions pu appliquer la relation (1) :

$\Delta_T \simeq L_t.\ \lambda\ (T - t) \simeq 150 \times 0{,}000023 \times (20 - 30) \simeq 150 \times -0{,}00023 \simeq -0{,}0345$ *mm*.

Le signe — indique qu'il s'agit d'une contraction.

Et $L_T = L_t + \Delta_T = 150 - 0{,}0345 = 149{,}9655$ *mm*.

II. — CORRECTION DES MESURES

Dans tout ce qui va suivre nous appellerons :

— L_t, L_T, L_{20} les longueurs réelles des pièces aux températures **t**, **T** et 20°,

— l_t', l_{20} les longueurs réelles des vérificateurs aux températures **t'** et 20°.

Admettons que l'instrument de mesure (pied à coulisse, micromètre, calibre...) soit à la température **t'** et la pièce à la température **t**. On a alors $L_t = l_t'$.

L'écart réel entre la cote mesurée et la cote imposée est rapporté à la température de 20°. C'est donc la différence de cote entre la cote réelle de la pièce L_{20} à 20° et la cote réelle du vérificateur l_{20} à 20° (température d'étalonnage des vérificateurs).

On a donc $\Delta_t = L_{20} - l_{20}$

Si $\Delta_t > 0$ la pièce est trop grande,

si $\Delta_t < 0$ la pièce est trop petite.

Nous verrons que cette erreur peut être parfois supérieure aux tolérances de fabrication des vérificateurs et même à celles des pièces.

A. CAS GÉNÉRAL

La pièce et le vérificateur ne sont pas à la même température et ont des coefficients de dilatation différents : λ pour la pièce, λ' pour le vérificateur.

En cours de mesure $L_t = l_t'$

Calculons $\Delta_t = L_{20} - l_{20}$

La relation (2) $L_T = L_t\ [1 + \lambda\ (T\text{-}t)]$ appliquée à la pièce avec $T = 20°$ s'écrit :

$$L_{20} = L_t\ [1 + \lambda\ (20 - t)] \text{ ou}$$
$$L_{20} = l_t'\ [1 + \lambda\ (20 - t)]$$

La relation (2) appliquée au vérificateur avec $L_T = l_{20}$ s'écrit :

$$l_{20} = l_t'\ [1 + \lambda'\ (20 - t')].$$

Retranchons membre à membre les deux égalités. Il vient :

$$\mathbf{L}_{20} - \mathbf{l}_{20} = \mathbf{l}_t' [1 + \lambda (20 - \mathbf{t})] - \mathbf{l}_t' [1 + \lambda' (20 - \mathbf{t}')] \text{ ou}$$

$$\Delta_t = \mathbf{l}_t' [\lambda (20 - \mathbf{t}) - \lambda' (20 - \mathbf{t}')]$$

$$\text{mais } \mathbf{l}_t' = \mathbf{l}_{20} [1 + \lambda' (\mathbf{t}' - 20)] \text{ d'où}$$

$$\Delta_t = \mathbf{l}_{20} [1 + \lambda' (\mathbf{t}' - 20)] [\lambda (20 - \mathbf{t}) - \lambda' (20 - \mathbf{t}')]$$

et comme $1 + \lambda' (\mathbf{t}' - 20)$ est sensiblement égal à 1 on a

$$\boxed{\Delta_t \simeq \mathbf{l}_{20} [\lambda (20 - \mathbf{t}) - \lambda' (20 - \mathbf{t}')]} \qquad (3)$$

Dans cette relation $\mathbf{l}_{20}$ est la longueur lue sur le vérificateur.

Application numérique. On contrôle une pièce en aluminium pour laquelle $\lambda = 2{,}3 \times 10^{-6}$ et $\mathbf{t} = 50°$ avec un vérificateur dont $\lambda' = 1{,}2 \times 10^{-6}$ et $\mathbf{t}' = 10°$. Cote 60 h 7. Quel est l'écart de cote réel et quelle est la longueur de la pièce à 20°.

La relation (3) donne l'accroissement.

$\Delta_t \simeq 60 [2{,}3 \times 10^{-6} (20 - 50) - 1{,}2 \times 10^{-6} (20 - 10)]$

$\Delta_t \simeq 60 \times -81 \times 10^{-6} \simeq -0{,}0486 \; mm \simeq -48{,}6 \; \mu$

L'accroissement étant négatif, la pièce sera trop faible de 48,6 μ et sa longueur à 20° sera de :

$$60 - 0{,}0486 \simeq 59{,}9514 \; mm$$

L'écart de cote à 20°, 48,6 μ est donc supérieur à la tolérance de fabrication qui, pour 60 h 7 est égale à 30 μ. La pièce serait donc rebutée.

B. CAS PARTICULIERS

1er Cas. — La pièce et le vérificateur sont à des températures différentes mais ont même coefficient de dilatation.

La relation (3) avec $\lambda = \lambda'$ et $\mathbf{t} \neq \mathbf{t}'$ devient

$$\Delta_t \simeq \mathbf{l}_{20} [\lambda (20 - \mathbf{t}) - \lambda (20 - \mathbf{t}')] \text{ soit}$$

$$\Delta_t = \mathbf{l}_{20} \lambda (\mathbf{t} - \mathbf{t}')$$

Application numérique. Une pièce à 50° est contrôlée avec un vérificateur à 10°, tous deux en acier dont $\lambda = 1{,}2 \times 10^{-6}$. Cote 60 h 7. Quelle est la correction de mesure à 20° ?

$$\Delta_t \simeq 60 \times 1{,}2 \times 10^{-6} \times (10 - 50) \simeq 60 \times 1{,}2 \times 10^{-6} \times -40$$

$$\text{soit } \Delta_t \simeq -0{,}0288 \; mm \simeq -28{,}8 \; \mu$$

La cote à 20° sera supérieure de 1,2 μ seulement à la cote mini puisque l'écart inférieur donné par la tolérance est de 30 μ.

2e Cas. — La pièce et le vérificateur sont à la même température mais ont des coefficients de dilatation différents.

La relation (3), en faisant $\mathbf{t} = \mathbf{t}'$ et $\lambda \neq \lambda'$ devient

$$\Delta_t \simeq \mathbf{l}_{20} [\lambda (20 - \mathbf{t}) - \lambda' (20 - \mathbf{t})] \text{ soit}$$

$$\Delta_t \simeq \mathbf{l}_{20} (20 - \mathbf{t}) (\lambda - \lambda')$$

Application numérique. A la température $t = t' = 10°$ on mesure une pièce en duralumin ($\lambda = 2{,}3 \times 10^{-6}$) avec un étalon en acier ($\lambda' = 1{,}2 \times 10^{-6}$) cote 60. Quelle est la correction de la mesure ?

$$\Delta_t \simeq 60 \times (20 - 10) \times (2{,}3 - 1{,}2) \times 10^{-6}$$

$$\Delta_t \simeq 0{,}0066 \simeq 6{,}6\ \mu$$

3e Cas. — Le vérificateur et la pièce sont à la même température et ont même coefficient de dilatation. Quelle est la correction de la mesure ?

La relation (3) s'écrit alors :

$$\Delta_t \simeq l_{20} [\lambda (20 - t) - \lambda (20 - t)]$$

$$\Delta_t \simeq l_{20} \times 0 = 0.$$

Dans ce cas la pièce et le calibre conservent les mêmes dimensions à toutes les températures et l'erreur de mesure est nulle.

4e Cas. — La pièce et le calibre sont à 20° et ont des coefficients de dilatation différents.

La relation (3) devient :

$$\Delta_t \simeq l_{20} [\lambda (20 - 20) - \lambda' (20 - 20)] \text{ soit}$$

$$\Delta_t = 0.$$

C. CONCLUSIONS

Nous avons montré par cette étude que les effets de dilatations thermiques sont très sensibles même pour des variations de température assez faibles.

Les calculs que nous avons donnés, à simple titre justificatif, ne sauraient faire l'objet d'une pratique industrielle courante. Ils sont basés en effet sur la connaissance exacte de la température de la pièce et du vérificateur et aussi de leurs coefficients de dilatation.

Or, la mesure de température localisée à la surface contrôlée est pratiquement impossible. Il faudra donc, à l'atelier, tenir compte des remarques ci-après :

— **l'ébauche provoquant un échauffement important des pièces, il est indispensable de les laisser refroidir avant de passer à la finition.** Cette dernière opération étant faite avec une faible section de copeau, l'échauffement est négligeable et, comme le vérificateur et la pièce sont sensiblement à la même température, l'erreur thermique ne peut provenir que de la différence de coefficients de dilatation. Elle est donc pratiquement insignifiante. Ebauche et finition feront donc l'objet de deux phases distinctes de fabrication.

— pour les travaux de précision, l'installation d'une salle climatisée à 20° et isolée thermiquement est absolument nécessaire.

La première pièce de la série sera vérifiée au comparateur *Solex* monté sur la machine. Le régleur en notera la cote lue à 1 μ près. La pièce mise en attente dans la salle climatisée y sera de nouveau mesurée mais à la température de référence de 20°. La correction à faire subir au réglage de la machine-outil sera déduite de cette cote ainsi que la lecture à obtenir sur la machine-outil.

Ex. : Cote à obtenir 32 *g* 6 : $32 \begin{matrix} - 0{,}009 \\ - 0{,}025 \end{matrix}$ Cote moyenne : 31,983.

Mesure au comparateur *Solex* de la machine : 32,008.

Mesure dans la salle climatisée à 20° : 32,001.

Correction à effectuer pour obtenir la cote moyenne à 20° :

$$32{,}001 - 31{,}983 = 0{,}018\ mm \text{ en moins.}$$

Lecture moyenne à obtenir sur le comparateur *Solex* de la machine, après réglage final

$$32{,}008 - 0{,}018 = 31{,}990\ mm$$

— les erreurs dues à l'appareil et à l'opérateur s'ajoutent évidemment aux erreurs thermiques, d'où il résulte qu'une mesure est presque toujours entachée d'incertitude et qu'on ne prend jamais assez de précautions pour en limiter l'ampleur.

Résumé

ERREURS THERMIQUES. Les dilatations thermiques modifient les dimensions des pièces et créent des variations très sensibles entre la cote lue à la température de l'atelier et la cote théorique à la température de référence de 20°.

La variation de longueur Δ, dilatation ou contraction, est fonction du coefficient de dilatation λ, de la longueur et de la variation de température.

Lorsque la température passe de t° à T°, la variation de longueur est $\Delta t = L_T \lambda (T - t)$ et la longueur L_T à T° est donnée par la relation

$$L_T = L_t [1 + \lambda (T - t)]$$

Les vérificateurs sont étalonnés à 20° et l'erreur de mesure par suite de dilatation thermique est donc la différence qu'il y a entre la cote réelle de la pièce L_{20} à 20° et la cote réelle l_{20} du vérificateur à 20°

$$\text{soit } \Delta t = L_{20} - l_{20}$$

Si $\Delta_t > 0$ la pièce est trop grande,

si $\Delta_t < 0$ la pièce est trop petite.

La correction à apporter est donnée par la relation générale

$$\Delta_t \simeq l_{20} [\lambda (20 - t) - \lambda' (20 - t')]$$

dans laquelle : l_{20} = température du vérificateur à 20°,

λ = coefficient de dilatation linéaire de la pièce,

λ' = coefficient de dilatation linéaire du vérificateur,

t = température de la pièce,

t' = température du vérificateur.

Pratiquement, la correction n'est pas calculée parce qu'on ne peut pas connaître les températures avec précision. On mesure la pièce à l'atelier, puis dans la salle de contrôle à 20° et on a ainsi la correction à faire subir à la mesure d'atelier.

MÉTROLOGIE (Suite)

ÉLIMINATION DES ERREURS

Les causes d'erreurs provenant tant de la construction des instruments de mesure et de contrôle que de leur maniement étant connues, il faut s'attacher à les neutraliser.

Les dispositifs que nous allons étudier répondent à cet objet.

I. — MICROMÈTRE

L'entraînement de la vis micrométrique par un dispositif à friction évite la variation de la pression de contact des touches avec la sensibilité de l'opérateur, de même qu'entre l'étalonnage de l'appareil et son emploi.

II. — COMPARATEUR A AMPLIFICATION MÉCANIQUE

La pression de contact du palpeur est assurée par un ressort de faible puissance (50 à 300 g). Cette disposition élimine les déformations de l'appareil et les différences de pression entre l'étalonnage sur cale et la mesure de l'écart sur la pièce.

D'autre part, le ressort rend la vérification très rapide.

III. — COMPARATEUR PNEUMATIQUE

Cet appareil a le gros avantage de permettre des mesures sans contact (par étranglement ou par laminage direct, voir classe de 3e, sixième leçon). Il ne peut donc, dans ce cas, donner lieu à aucune erreur de mesure.

Dans le cas de mesure avec pression de contact (mesure par laminage indirect) les déformations sont pratiquement nulles puisque le contact est assuré par un ressort à faible puissance.

IV. — COMPARATEURS OPTIQUES

Parmi les nombreux types en usage nous n'étudierons que le **micro-mesureur optique,** employé pour les mesures d'atelier, et l'**interféromètre** pour les mesures de laboratoire.

A. MICRO-MESUREUR OPTIQUE

L'amplification est opto-mécanique, c'est-à-dire qu'elle résulte de la combinaison d'un levier optique et d'un levier mécanique.

Principe du levier optique. Le levier optique (fig. 104) comprend :

— un miroir pivotant destiné à recevoir le rayon incident **R** i provenant d'une source de lumière fixe,

— un écran sur lequel arrive le rayon réfléchi **R** r.

Lorsque le miroir pivote d'un angle α par suite du déplacement du palpeur qui en est solidaire, le rayon réfléchi **R** r vient en **R**'r et balaye un angle égal à 2 α. Le rayon incident et le rayon réfléchi sont les bras du levier optique qui double l'angle de déplacement.

D'autre part, la distance **E** sur l'écran, ou élongation, parcourue par le rayon réfléchi, rapportée au déplacement **e** du palpeur, mesure le rapport d'amplification du miroir, soit :

$$\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{e}} = \text{amplification}$$

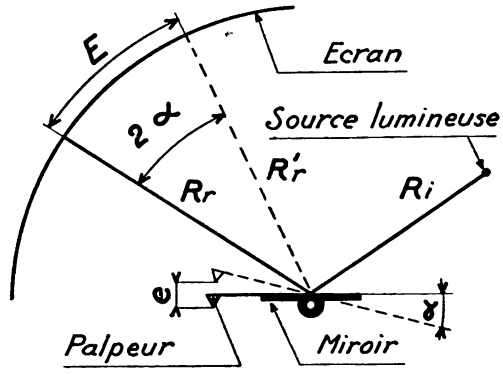


FIG 104_ *Principe du levier optique.*

Réalisation du micro-mesureur optique (fig. 105). Un levier mécanique amplifie une première fois le déplacement du palpeur.

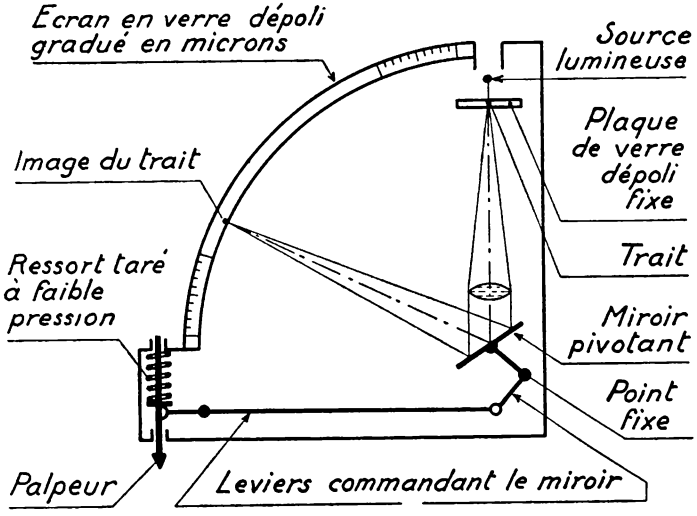


FIG 105_ *Schéma du micro-mesureur "Sagem".*

L'image d'un trait, gravé sur une plaque de verre dépoli et éclairé, arrive sur le miroir qui le projette sur une glace circulaire en verre dépoli et donne ainsi une deuxième amplification du mouvement du palpeur.

L'amplification globale peut atteindre 1 000 et indique l'écart avec une précision de l'ordre du micron. La capacité de l'appareil est de 0,1 *mm*.

La pression sur le palpeur est assurée par un ressort taré à une faible pression.

B. INTERFÉROMÈTRE

L'étude des interférences lumineuses a conduit à un procédé de mesure des longueurs d'une très grande précision utilisé surtout en laboratoire de métrologie.

PROPRIÉTÉS DE LA LUMIÈRE. La lumière se propage en ligne droite sous la forme d'un mouvement vibratoire dont la vitesse dans l'air est de 300 000 *km/s*. Les vibrations se reproduisent périodiquement (fig. 106) et leur **élongation**, écart entre l'amplitude positive et l'amplitude négative, caractérise leur intensité. De plus, le trajet rectiligne parcouru pendant une période est la **longueur d'onde** λ (1), caractéristique invariable des vibrations lumineuses correspondant aux différentes couleurs : 0,40 μ pour le violet, 0,44 μ pour l'indigo, 0,48 μ pour le bleu, 0,56 μ pour le vert, 0,58 μ pour le jaune, 0,65 μ pour l'orange et 0,70 μ pour le rouge.

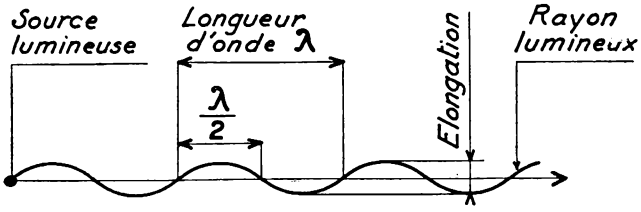


FIG 106 – *Propagation de la lumière.*

La lumière blanche est constituée par la superposition des lumières colorées précédentes. On peut en effet la décomposer en lui faisant traverser un prisme de verre et on obtient alors sur un écran des raies juxtaposées formant le spectre lumineux (arc-en-ciel).

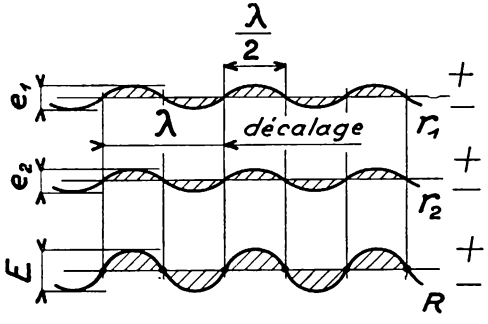


FIG 107 – *Les rayons identiques r_1 et r_2 sont en concordance. La somme de leurs élongations est $e_1 + e_2 = E$*

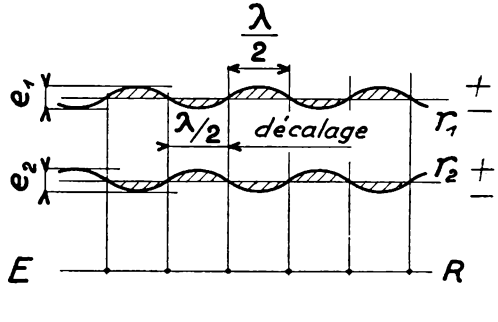


FIG 108 – *Les rayons identiques r_1 et r_2 sont en opposition. La somme de leurs élongations est $e_1 - e_2 = E = 0$.*

(1) Lettre grecque minuscule qui se prononce lambda.

En utilisant des sources de lumière connues, lampes à vapeur de mercure, au néon, à l'hélium..., les raies obtenues, dite monochromatiques parce qu'elles n'apparaissent que sous une seule couleur, ont chacune une longueur d'onde absolument invariable et connue avec précision. Le rouge de l'hélium, par exemple, a une longueur d'onde de 0,66781873 μ.

INTERFÉRENCES LUMINEUSES. Lorsque deux rayons lumineux identiques issus d'une même source frappent un même point après des parcours différents, il y a **interférence des mouvements vibratoires** en ce point et l'intensité lumineuse y est égale à la somme algébrique des deux.

Si les deux rayons arrivent en **concordance** (fig. 107), c'est-à-dire décalés dans le temps et, par suite, en longueur de parcours, d'un multiple de λ, leurs intensités s'ajoutent et le point apparaît fortement éclairé. Une ligne de ces points forme une **frange brillante.**

Si les deux rayons arrivent en *opposition* (fig. 108), c'est-à-dire décalés de $\frac{\lambda}{2}$, leurs intensités se retranchent et le point apparaît sombre. La ligne de points forme une **frange obscure.**

Principe de l'interféromètre.

Considérons un rayon 1, issu d'une source monochromatique traversant la face parfaitement plane d'une lentille (fig. 109) et venant se réfléchir sur un plan métallique. L'œil le perçoit suivant **OPM**. Considérons un rayon identique 2 issu de la même source et réfléchi en **P** sur la lentille. L'œil le perçoit suivant **OP.**

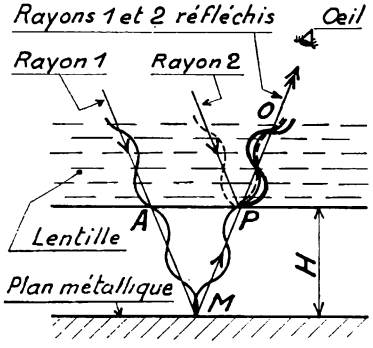


FIG 109 - *Les rayons 1 et 2 sont en concordance au point P. L'œil perçoit une frange brillante.*

Si les deux rayons sont en concordance en **P**, ce point appartient à une frange brillante. Si, au contraire, les rayons y sont en opposition, le point appartient à une frange obscure.

Si les rayons 1 et 2 sont très voisins de la perpendiculaire à la face de la lentille, en faisant varier la hauteur **H** qui sépare la lentille du plan métallique, on fera apparaître des franges brillantes lorsque H sera multiple de $\frac{\lambda}{2}$, le chemin **AMP** étant alors multiple de λ, et on fera apparaître des franges obscures lorsque H variera de $\frac{\lambda}{4}$ par rapport à la valeur précédente.

On peut donc imaginer qu'un déplacement du plan métallique fasse apparaître à sa surface alternativement une plage éclairée puis une plage sombre, ou que, ce plan n'étant pas parfait, il apparaisse comme une carte sur laquelle sont tracées des courbes de niveau (fig. 110).

Si on dispose au-dessous de la lentille une glace parfaitement plane et légèrement inclinée par rapport à la lentille (fig. 111), sa surface présentera des droites alternativement situées à $\frac{\lambda}{2}$ ou $\left(\frac{\lambda}{2}+\frac{\lambda}{4}\right)$, puis $2\frac{\lambda}{2}$ ou $\left(\frac{2\lambda}{2}+\frac{\lambda}{4}\right)$, puis $\frac{3\lambda}{2}$ ou $\left(\frac{3\lambda}{2}+\frac{\lambda}{4}\right)$, ... de la lentille. Ces droites seront le siège de franges alternativement brillantes et obscures comme l'indique la figure. Une cale suffisamment polie placée sur la glace accusera également un faisceau de franges qui se différenciera pratiquement toujours du précédent.

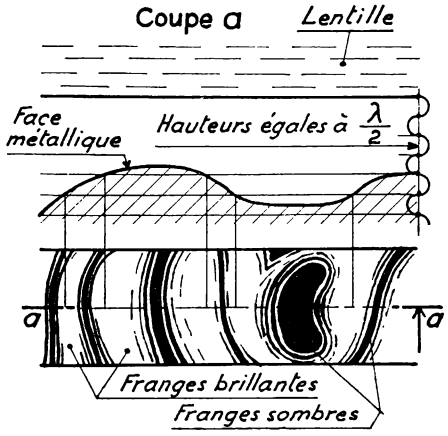


FIG 110 _ *La face métallique imparfaitement plane présente des plages brillantes et des plages sombres.*

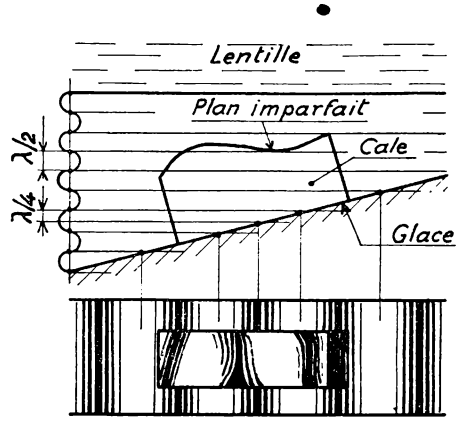


FIG 111_ *Les franges de la glace sont équidistantes, celles de la cale sont irrégulières.*

Schéma de réalisation de l'interféromètre.

Les rayons issus d'une source monochromatique (fig. 112) se réfléchissent sur une glace transparente et viennent frapper la face plane L de la lentille, puis la face supérieure de la cale à contrôler ou la face de la glace optiquement plane servant d'appui à la cale. Ils viennent enfin jusqu'à la lunette grossissante et à l'œil de l'observateur.

Comme nous l'avons montré par les figures 109-110 et 111, un réseau de franges brillantes et de franges sombres apparaît à la surface de la cale et de la glace.

INTERPRÉTATION DES OBSERVATIONS. Si la face de la cale est plane, les franges sont rectilignes, parallèles et régulièrement espacées (fig. 113-a).

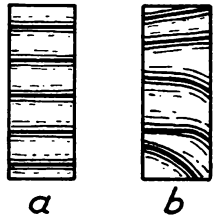


FIG 113_ *La face est plane en a, elle ne l'est pas en b*

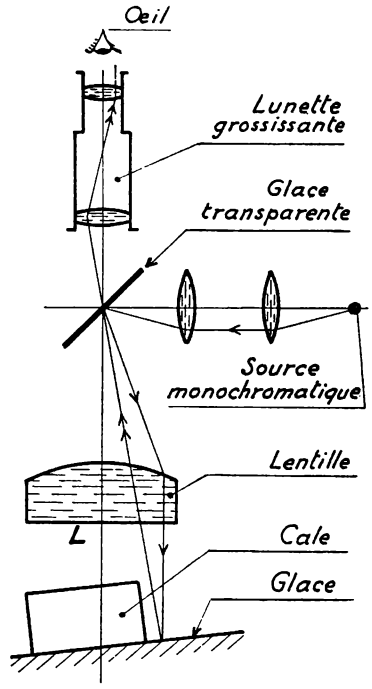


FIG 112_ *Schéma optique de l'interféromètre.*

Si la face de la cale n'est pas plane, les franges sont courbes, inégalement espacées et non parallèles (fig. 113-b).

Si la face de la cale est plane et parallèle à la face de la glace, les franges sont parallèles et également espacées sur les deux (fig. 114-a).

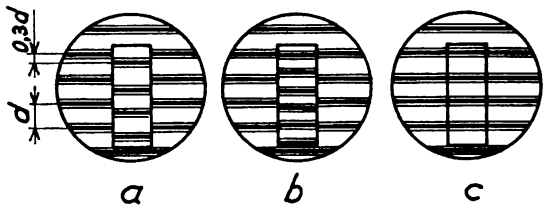


FIG 114 - *En a les faces sont parallèles, en b elles ne le sont pas. En c, l'épaisseur est multiple de $\lambda/2$, en a elle est multiple de $\lambda/2$ augmenté de 0,3 $\lambda/2$.*

Si la face de la cale est plane mais non parallèle à la face de la glace, les franges n'ont pas le même espacement sur la cale et sur la glace (fig. 114-b).

Si la face de la cale est parallèle à celle de la glace et si les réseaux de franges coïncident, l'épaisseur de la cale est multiple de la demi-longueur d'onde $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ de la lumière monochromatique utilisée (fig. 114-c).

Enfin si les réseaux de franges sont décalés, l'épaisseur de la cale est un multiple de $\frac{\lambda}{2}$ augmenté de la fraction de $\frac{\lambda}{2}$ correspondant au décalage des franges (fig. 114-a).

Mesures à l'interféromètre.

MESURE PAR COMPARAISON. Soient une pièce de hauteur réelle **H** inconnue et un bloc de cales étalons accolées de hauteur exacte connue **E**. Nous nous proposons de contrôler l'identité de **H** et de **E** ou de mesurer leur écart **h**. Après avoir vérifié la planéité des faces de la pièce et leur parallélisme (fig. 113-a et 114-a), plaçons pièce et étalon côte à côte sur la glace de l'interféromètre et évaluons la fraction de décalage des franges pour plusieurs radiations différentes données par l'appareil (fig. 115).

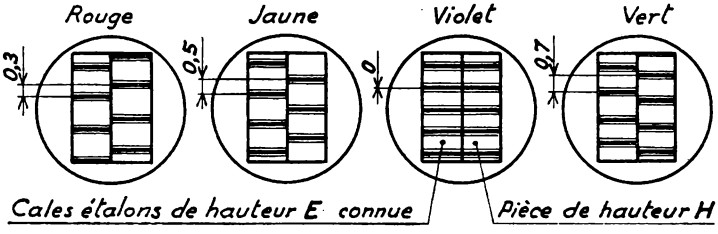


FIG 115 - *Observation des franges en mesure par comparaison.*

Supposons par exemple que les franges soient décalées entre pièce et cale :
— de 0,3 de leur intervalle pour le rouge de l'hélium avec $\lambda = 0{,}6678\ \mu$;
— de 0,5 de leur intervalle pour le jaune de l'hélium avec $\lambda' = 0{,}5875\ \mu$;
— de zéro de leur intervalle pour le violet du mercure avec $\lambda'' = 0{,}4358\ \mu$.

Pour le rouge les hauteurs **h** possibles seront donc $0{,}3\ \frac{\lambda}{2}$ puis $1{,}3\ \frac{\lambda}{2}$; $2{,}3\ \frac{\lambda}{2}$ ...

Pour le jaune les hauteurs **h** possibles seront donc $0{,}5\ \frac{\lambda'}{2}$ puis $1{,}5\ \frac{\lambda'}{2}$; $2{,}5\ \frac{\lambda'}{2}$ ...

Pour le violet les hauteurs **h** possibles seront donc 0 puis $\frac{\lambda''}{2}$; $2\ \frac{\lambda''}{2}$ ...

Ces valeurs de **h** calculées et arrondies sont donc :

pour le rouge : 0,10 - **0,43** - 0,76 - 1,10... 2,43 - **2,76** - **3,10** - 3,43...
pour le jaune : 0,14 - **0,44** - 0,73 - 1,02... 2,50 - **2,79** - **3,09** - 3,39...
pour le violet : 0,00 - 0,21 - **0,43** - 0,65... 2,61 - **2,82** - **3,04** - 3,26...

La hauteur réelle **h** doit se retrouver identiquement dans les trois séries de valeurs. Les solutions possibles sont donc : 0,43 - 0,44 - 0,43 d'une part, dont la moyenne est 0,433 μ, ou 2,76-2,79 - 2,82 d'autre part, dont la moyenne est 2,790 μ ou enfin 3,10 -3,09 - 3,04 dont la moyenne est 3,076 μ.

Comme on connaît déjà la valeur de **H** à 1 ou 2 microns près, on peut choisir facilement l'écart **h** qui convient. Dans le cas présent, on aurait un doute pour les valeurs 2,790 et 3,076 surtout et, pour lever l'indétermination, il faudrait refaire une observation avec une autre couleur, vert par exemple, et confronter les quatre séries de valeurs. Supposons que le décalage entre franges soit de 0,7 de leur intervalle pour le vert de l'hélium avec $\lambda''' = 0{,}5015$ μ. Les valeurs de **h** seraient : 0,17 - **0,42** - 0,67 - 0,92... 2,42 - 2,67 - 2,92 - 3,17...
et on voit que la seule valeur compatible avec les résultats précédents est 0,42, celle qui viendrait plus loin se trouverait au delà de 5 μ, de sorte que le choix ne présenterait plus d'ambiguïté.

La première valeur moyenne de **h** possible serait donc :

$$\frac{h = 0{,}43 + 0{,}44 + 0{,}43 + 0{,}42}{4} = 0{,}43 \ \mu$$

MESURE DIRECTE. Dans ce cas, la pièce est placée seule sur la glace de l'appareil (fig. 114-a) et on procède comme précédemment après avoir cependant calculé le nombre approximatif de demi-longueurs d'onde compris dans la hauteur de la pièce.

Supposons que nous ayons mesuré au comparateur **H** = 16,01 *mm*. Nous aurons dans cette hauteur :

$\frac{16{,}01 \times 2 \times 1\,000}{0{,}6678}$ = 47 948 demi-longueurs d'onde pour le rouge ;

$\frac{16{,}01 \times 2 \times 1\,000}{0{,}5875}$ = 52 800 demi-longueurs d'onde pour le jaune ;

$\frac{16{,}01 \times 2 \times 1\,000}{0{,}4358}$ = 73 474 demi-longueurs d'onde pour le violet ;

$\frac{16{,}01 \times 2 \times 1\,000}{0{,}5015}$ = 63 848 demi-longueurs d'onde pour le vert.

Les hauteurs correspondantes seront :

$\frac{47\,948 \times 0{,}6678}{2} = 16{,}00984$ *mm* ; $\frac{52\,800 \times 0{,}5875}{2} = 16{,}010$ *mm* ;

$\frac{73\,474 \times 0{,}4358}{2} = 16{,}00998$ *mm* ; $\frac{63\,848 \times 0{,}5015}{2} = 16{,}00988$ *mm*.

En supposant qu'on ait relevé les mêmes décalages de franges que précédemment, les séries de valeurs possibles pour **H** seraient obtenues en ajoutant aux précédentes celles de **h** déjà calculées, soit :

rouge : 16,00984 - 16,00994... 16,01094 - **16,01127** - 16,01160...
jaune : 16,01000 - 16,01014... 16,01102 - **16,01131** - 16,01161...
violet : 16,00998 - 16,01019... 16,01106 - **16,01128** - 16,01150...
vert : 16,00988 - 16,01005... 16,01105 - **16,01130** - 16,01155...

Les valeurs compatibles étant :

16,01127 - 16,01131 - 16,01128 - 16,01130, la hauteur de la pièce est égale à leur moyenne, soit **H** $\times$ 16,01129 *mm*.

Résumé

Les erreurs inhérentes à la construction et au maniement des appareils de mesure ou de contrôle sont neutralisées par la limitation de la pression de contact ou par la suppression du contact.

MICROMÈTRE. L'entraînement par friction évite les variations de pression sur les touches en même temps que la déformation du corps de l'appareil.

COMPARATEUR MÉCANIQUE. Un ressort à faible puissance rend constante la pression sur la touche et élimine les déformations des divers organes du comparateur.

COMPARATEUR PNEUMATIQUE. Dans le cas de mesure sans contact, il n'existe aucune cause d'erreur.

Dans le cas de mesure avec contact, la régularité de la pression de contact et l'indéformabilité sont obtenues par un ressort à faible puissance.

MICRO-MESUREUR OPTIQUE. Deux amplifications, l'une par levier optique, l'autre par levier mécanique avec ressort taré à faible pression, assurent l'indéformabilité du système et une précision de l'ordre du micron.

INTERFÉROMÈTRE. Basé sur les propriétés de la lumière et sur l'apparition de franges d'interférence, l'interféromètre assure le contrôle de la planéité et du parallélisme ainsi que la mesure directe ou par comparaison sans aucun contact avec la pièce.

L'appareil, réservé aux mesures de laboratoire, est d'une très grande fidélité et sa précision est de l'ordre du dixième de micron.

MÉTROLOGIE (Suite)

LES COMPARATEURS ÉLECTRIQUES

I. — PRINCIPE GÉNÉRAL DE LEUR CONSTRUCTION

1° Un **capteur-palpeur** capte les variations de longueur et les traduit en variations d'une grandeur électrique.

2° Le **circuit électrique** qui comporte cette grandeur amplifie sa variation et provoque le maximum de perturbation de la tension existant entre deux points.

3° **L'appareil de lecture** est un voltmètre très sensible. Mais, par commodité, le cadran est gradué directement en microns.

II. — CAPTEUR-TRADUCTEUR. PHÉNOMÈNES DE BASE

A. APPAREILS A PALPEUR MÉCANIQUE AU CONTACT DE LA PIÈCE A CONTROLER

Le palpeur, du type mécanique, provoque par ses déplacements la variation d'une grandeur électrique telle que résistance **R** ou inductance **L** ou capacité **C**. Il en résulte des variations de tension dans le circuit.

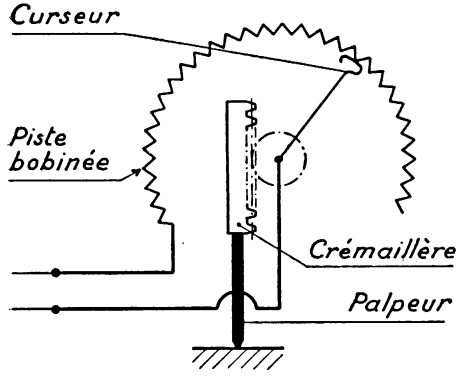


FIG 116_ *Le déplacement du palpeur entraîne le déplacement du curseur.*

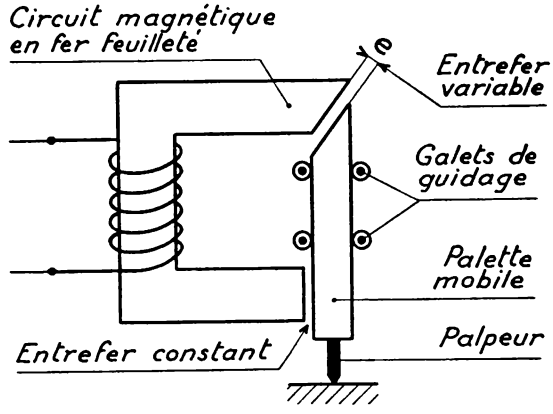


FIG 117_ *La variation de l'entrefer e provient du déplacement du palpeur.*

1° Variation de résistance R. Le palpeur déplace le curseur sur la piste bobinée d'un rhéostat (fig. 116) dont la résistance **R** varie en même temps.

2° Variation d'inductance L. L'inductance de la bobine varie beaucoup avec l'écartement du petit entrefer **e** pratiqué dans le circuit magnétique et lié au palpeur (fig. 117). Mais le mauvais guidage de la palette provoque aussi la modification des entrefers par attraction (électro-aimant). Aussi ce système est-il de moins en moins utilisé.

3° Variation de capacité C. Elle est provoquée par action du palpeur sur l'épaisseur du diélectrique ($\mathbf{C} = \frac{\mathbf{k}}{\mathbf{e}}$, fig. 118), ou sur la nature du diélectrique ($\mathbf{c} = \mathbf{k}\,\varepsilon$ (1), fig. 119), ou sur la surface **S** en regard des armatures ($\mathbf{C} = \mathbf{k}\,\mathbf{S}$, fig. 120)

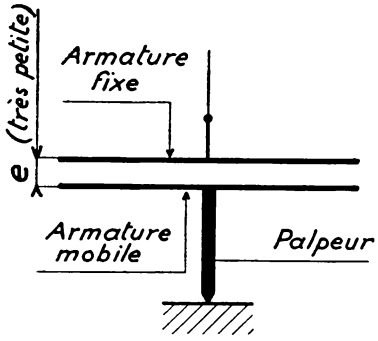


FIG 118 _ *Le déplacement du palpeur entraîne une variation de l'épaisseur e de l'isolant qui est l'air.*

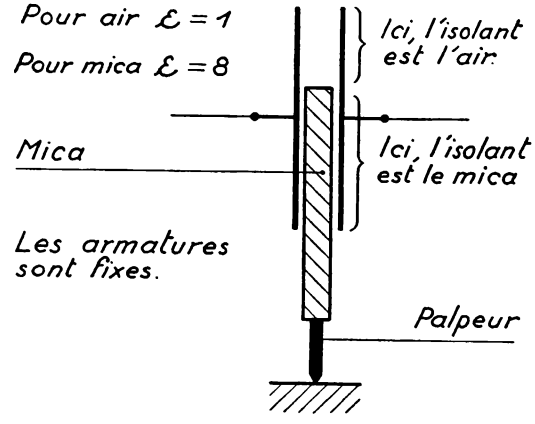


FIG 119 _ *Le déplacement du palpeur fait varier l'enfoncement de l'isolant mica et la partie correspondant à l'isolant air.*

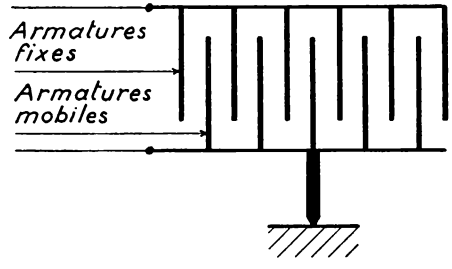


FIG 120 _ *Le déplacement du palpeur fait varier la surface en regard des armatures.*

Dans tous les cas, la variation de capacité **C** se fait sans frottements et avec des effets d'attraction négligeables. Il en résulte que ce traducteur est le plus employé actuellement.

La liaison entre le palpeur et la résistance, l'inductance ou la capacité, peut comporter une amplification mécanique intermédiaire.

(1) Lettre grecque minuscule qui se lit épsilon.

B. APPAREILS DE MESURE SANS CONTACT

Le palpeur et ses transmissions mécaniques, soumis à l'usure, sont remplacés par un très fin pinceau lumineux tombant sur une cellule photo-électrique après avoir reçu une amplification optique.

Le courant de saturation qui traverse les cellules photo-émissives à vide est proportionnel au flux lumineux tombant sur la cathode (fig. 121). Par suite, toute variation de hauteur entre la pièce à vérifier et la cale étalon modifiera la quantité de lumière reçue par la cellule (fig. 122) et aussi le courant qui parcourt le circuit.

On procède ainsi pour le contrôle en cours de fabrication de produits progressant de manière continue (étirage, laminage à chaud). Dans le contrôle du diamètre d'un fil par exemple, on obtient une précision de 2,5 μ.

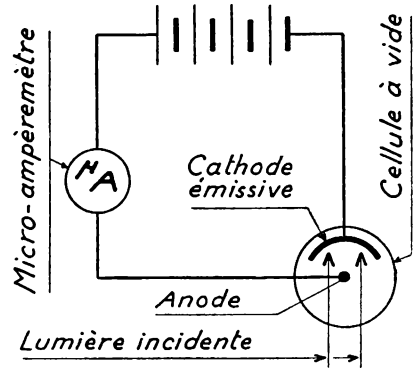


FIG 121 _ *Tout se passe comme si la lumière incidente qui frappe la cathode rendait le vide de la cellule conducteur.*

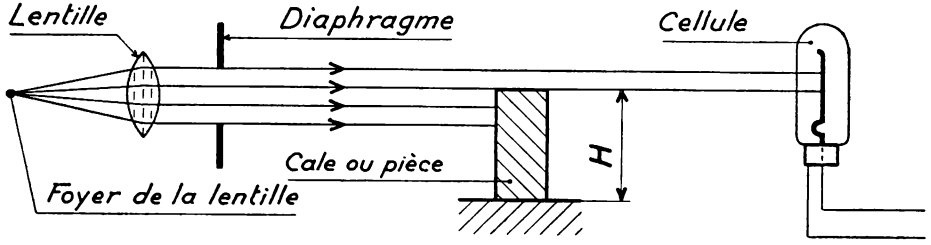


FIG 122 _ *La différence de cote entre la cale et la pièce entraîne une différence de quantité de lumière tombant sur la cellule, à condition que l'éclairement soit rigoureusement constant.*

III. — DESCRIPTION DE QUELQUES COMPARATEURS

Nous nous limiterons à ceux dont le principe peut être compris par référence aux cours d'électricité industrielle de 2e I et 1er I.

A. UTILISATION D'UN CIRCUIT EN RÉSONANCE

Dans un circuit comprenant une résistance, une self et une capacité en série, en alternatif (fig. 123) l'intensité est donnée par

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{U}}{\sqrt{\mathbf{R}^2 + \left(\mathbf{L}\,\omega - \frac{1}{\mathbf{C}\,\omega}\right)^2}}$$

Le circuit est mis en résonance lorsque $\mathbf{L}\,\omega = \frac{1}{\mathbf{C}\,\omega}$ soit $\mathbf{L}\,\mathbf{C}\,\omega^2 = 1$. L'intensité est alors maximum et vaut $\mathbf{I} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{R}}$.

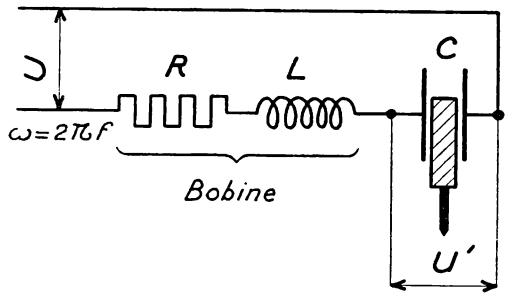


Fig 123 _ *Le déplacement du palpeur entraîne une variation de capacité qui modifie la tension U' entre les bornes des armatures.*

A ce moment les tensions aux bornes de **L** et de **C** sont aussi maxima et ont pour valeur commune

$$\mathbf{U'} = \mathbf{L}\,\omega\,\mathbf{I} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{C}\,\omega}$$

La valeur de la résistance **R** est prévue de telle sorte que **U'**, correspondant à la résonance, soit beaucoup plus forte que **U**. Dès qu'on s'écartera de la résonance, la chute de tension se manifestera donc très nettement.

Le palpeur est solidaire de l'armature mobile de la capacité **C**. La cale étant sous le palpeur on réalise la condition de résonance $\mathbf{L}\,\mathbf{C}\,\omega^2 = 1$ en ajustant ω grâce à un oscillateur placé dans l'appareil.

La moindre variation de cote entraînera une variation de **C**, le circuit ne sera plus en résonance, et le voltmètre aux bornes de **C** accusera une baisse de tension très nette.

L'appareil a une sensibilité de l'ordre 0,1 μ.

B. UTILISATION D'ÉCHELLES MICROMÉTRIQUES

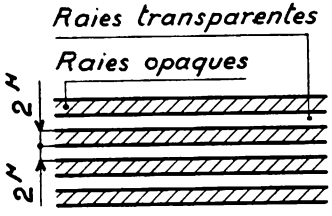


Fig 124 _ *Une échelle très grossie.*

Deux échelles identiques d'une grande finesse (fig. 124) gravées sur verre peuvent se déplacer latéralement l'une par rapport à l'autre. Elles sont constituées par des bandes opaques de largeur constante séparées par des bandes transparentes de même largeur (2 microns).

L'une des échelles constitue la référence, l'autre est liée à la surface à contrôler et se déplace donc devant la première. Un pinceau lumineux dirigé sur les échelles ne pourra les traverser que lorsque les raies transparentes seront face à face (fig. 125), ce pinceau viendra alors frapper une cellule photo-électrique. Tout décalage amènera l'interruption du flux lumineux (fig. 126) et la cellule marquera le nombre de passages d'une raie opaque devant la raie transparente sous la forme d'impulsions.

Ces impulsions sont, après amplification, comptées par la roue à rochet d'un relais (fig. 127). Leur nombre marque donc la différence de cote.

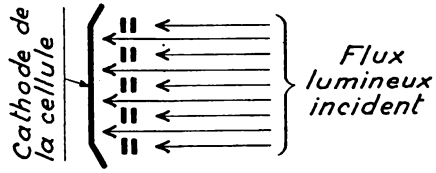


FIG 125 — *Les échelles ont leurs raies en concordance : des raies de lumière arrivent à la cellule et le courant la traverse.*

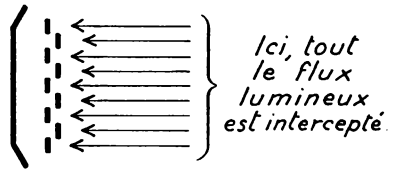


FIG 126 — *Les échelles ont leurs raies contrariées : la lumière n'arrive pas à la cellule et le courant ne la traverse pas.*

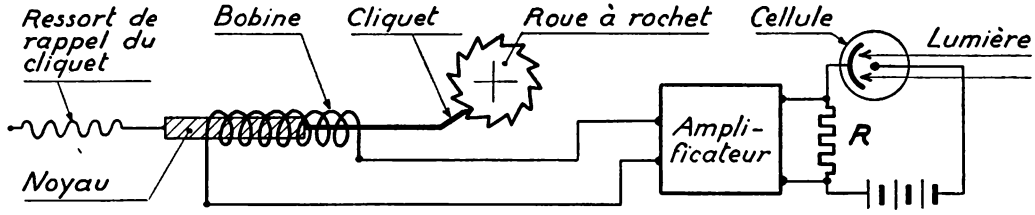


FIG 127 — *Lorsque le courant passe par la cellule, le noyau est "avalé" et la roue à rochet, qui est la roue compteuse, est entraînée.*

IV. — COMPARATEURS ÉLECTRONIQUES

Les techniques modernes de fabrication exigent une grande homogénéité dans la précision et les appareils que nous avons décrits précédemment ne permettent pas une amplification et une fidélité suffisantes, car le palpeur seul doit provoquer la variation de la mesure.

Il faut donc stabiliser les tensions d'alimentation en dépit des inévitables fluctuations de la tension du secteur, compenser l'influence de la température sur les résistances et les capacités...

Pour remplir ces dernières conditions et obtenir des amplifications de plus de 100 000, il faut avoir recours à l'électronique. Pratiquement, les comparateurs électriques sont donc devenus des comparateurs électroniques. Ces appareils permettent, à l'atelier même, les plus hautes performances utilisables.

V. — APPAREILS DE CONTROLE AUTOMATIQUE

1° On peut adjoindre à un comparateur, quel qu'en soit le type, une commande auxiliaire électrique pour assurer un contrôle automatique, un triage des pièces bonnes ou rebutées, ou même pour effectuer leur comptage (fig. 128).

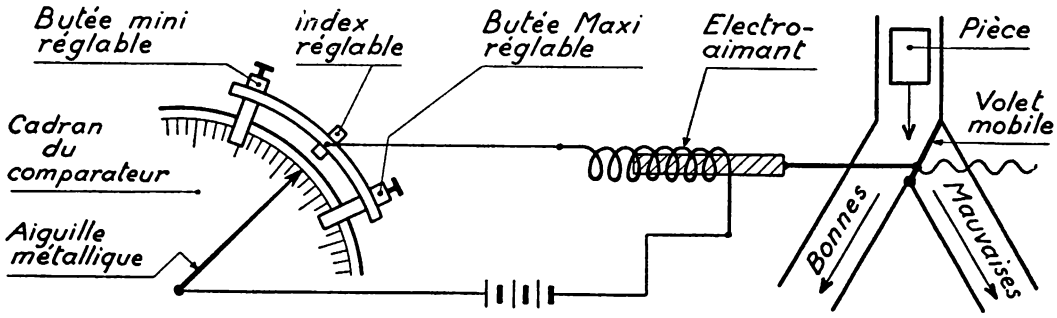


FIG 128 _ *Schéma d'un dispositif électrique de triage de pièces.*

Quand la cote de la pièce est comprise entre les limites prévues, l'aiguille métallique reste entre les butées maxi et mini. Le circuit électrique est alors ouvert et les pièces sont acheminées par gravitation dans le lot des **pièces bonnes.**

Au contraire si la cote de la pièce est trop faible ou trop forte, l'aiguille reste au contact d'une des deux butées et le circuit est fermé. L'électro-aimant attire alors le volet mobile qui livre passage aux **pièces mauvaises** vers le conduit qui leur est réservé.

2° Les comparateurs électriques se prêtent par nature aux contrôles automatiques puisque les dispositifs de commande des machines à cycle automatique obéissent à des variations de tensions tout comme ces comparateurs.

On peut donc contrôler simultanément plusieurs cotes, ou lire la cote d'une pièce en fabrication, ou même asservir la commande de la machine à la cote réelle de la pièce (tour à copier, machine à roder par exemple).

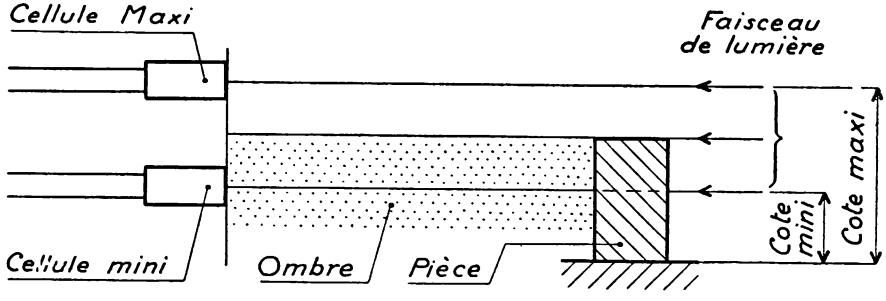


FIG 129 _ *Principe de la mesure automatique. Les cellules sont réglées suivant les tolérances admises.*

La figure 129 donne le principe d'une mesure automatique. Seule la cellule maxi doit être frappée par le pinceau lumineux. Si les deux cellules fonctionnent, la pièce est trop petite ; au contraire, si elles sont neutres toutes les deux, la pièce est trop grande.

VI. — RUGOSIMÈTRE

L'appréciation de l'état de fini d'une surface usinée n'est valable que si elle est objective. Or, une telle surface se ramène à une série de sillons plus ou moins profonds que nous avons appelés défauts microgéométriques.

Le **rugosimètre** permet d'apprécier ces défauts. Il est basé sur le principe suivant : dans un circuit fermé par un quartz piézo-électrique (fig. 130) toute pression exercée sur le quartz produit une tension **U** entre ses deux faces métallisées.

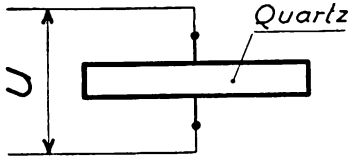


FIG 130 _ *Un quartz soumis à une force pressante produit une tension U entre ses deux faces métallisées.*

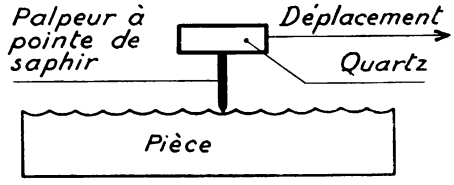


FIG 131 _ *La pression sur le quartz, donc la variation de tension, est fonction de la profondeur des sillons.*

Par suite, si l'on déplace sur une surface usinée le palpeur du rugosimètre (fig. 131), les variations de pression dues aux défauts microgéométriques feront varier la tension du circuit en fonction de la profondeur des sillons.

L'appareil est réglé sur une surface type, appelée **calibre de rugosité,** dont le fini est étalonné conformément aux normes. La tension alternative engendrée est amplifiée puis, après redressement, mesurée par un voltmètre. Il suffit de comparer cette tension à celle donnée par l'étalonnage.

VII. — CRITIQUES DES COMPARATEURS ÉLECTRIQUES

Les comparateurs électriques sont des appareils robustes, d'un maniement simple et rapide pour l'atelier, mais qui permettent aussi les plus hautes performances en laboratoire.

Ils permettent l'asservissement, le contrôle automatique, la lecture à distance. Leur prix, compte tenu des possibilités qu'ils offrent, est relativement peu élevé.

Résumé

PRINCIPE GÉNÉRAL. Les comparateurs électriques sont basés sur la transformation d'une variation de longueur en variation de tension mesurable.

APPAREILS A PALPEUR MÉCANIQUE. Le palpeur peut provoquer dans le circuit électrique :

— une variation de résistance R;

— ou une variation d'inductance L;

— ou une variation de capacité C.

La variation de capacité C donne les meilleurs résultats car elle se fait sans frottement.

Montés dans un circuit en résonance, ils sont très sensibles car ils ont alors une très grande amplification.

APPAREILS SANS CONTACT. Parmi ces appareils, certains utilisent la variation du flux lumineux reçu par une cellule photo-électrique.

L'amplification électronique augmente leur sensibilité et les erreurs de cote sont plus facilement et plus sûrement décelées.

Les comparateurs électroniques peuvent s'adapter au contrôle automatique, à la commande d'un dispositif à copier, à l'asservissement du réglage de la machine ou à la vérification microgéométrique des états de surface.

MÉTROLOGIE (Fin)

CONTROLE DES VÉRIFICATEURS A DIMENSIONS FIXES

Le service répété des vérificateurs à dimensions fixes, leur maniement sans précautions, provoquent à l'atelier leur usure rapide.

Il est donc nécessaire de faire subir à ces instruments un contrôle périodique comparable à celui qui accompagnait leur sortie de fabrication ou leur réception.

I. — CONDITIONS DU CONTROLE DES VÉRIFICATEURS

Préalablement au contrôle, il faut s'assurer :

— que l'équilibre thermique est réalisé à 20° C;

— que les surfaces de référence sont parfaitement propres.

Ensuite :

— le contrôle sera fait sous la même pression que celle d'emploi du vérificateur car des pressions différentes introduiraient des erreurs de mesure;

— les appareils à dimensions fixes utilisés pour ce contrôle auront la même forme que les pièces à vérifier, car des formes différentes donneraient lieu à des déformations élastiques différentes et à des erreurs de mesure;

— les appareils à amplification utilisés pour ce contrôle auront une précision de l'ordre du micron et un rapport d'amplification d'au moins 1 000.

II. — CONTROLE DES CALIBRES A LIMITES

Les calibres à limites sont, tout comme une pièce mécanique, établis avec des tolérances de fabrication normalisées (norme N F - E - 02.002).

— Pour le **côté entre,** la position de ces tolérances est telle que l'usure rapproche la cote réelle de la cote théorique au point de la dépasser même légèrement.

Ex. : 1° Pour un calibre à mâchoires 60 *g* 6, la cote théorique du maxi (côté entre) est à — 10 μ de la cote nominale, soit 59,990 *mm* (fig. 132).

Les limites de vérification du calibre admettent, par rapport à la cote nominale, des tolérances de — 11,5 μ à — 16,5 μ. Les cotes limites sont donc :

59,9885 *mm* qui est le maxi du maxi;

59,9835 *mm* qui est le mini du maxi.

2° Pour un tampon 60 *H* 7, la cote théorique du mini (côté entre) est à + 0 de la cote nominale soit 60 *mm* (fig. 133).

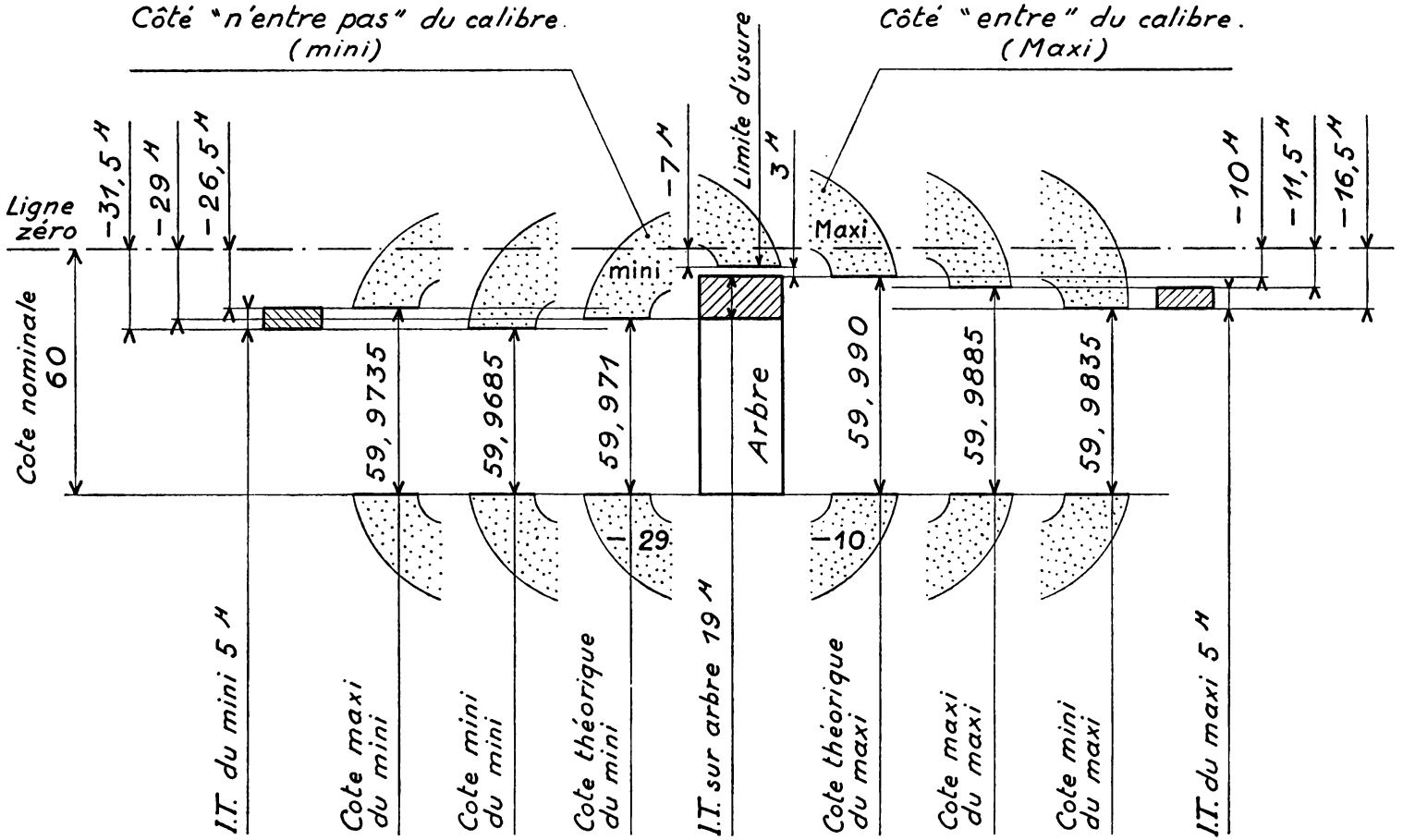


FIG 132 _ *Tolérances de fabrication et limite d'usure d'un calibre à mâchoires 60 g 6.*
Remarquer les tolérances sur la pièce et celles sur chaque côté du calibre ainsi que la limite d'usure qui s'applique au "côté entre" seulement.

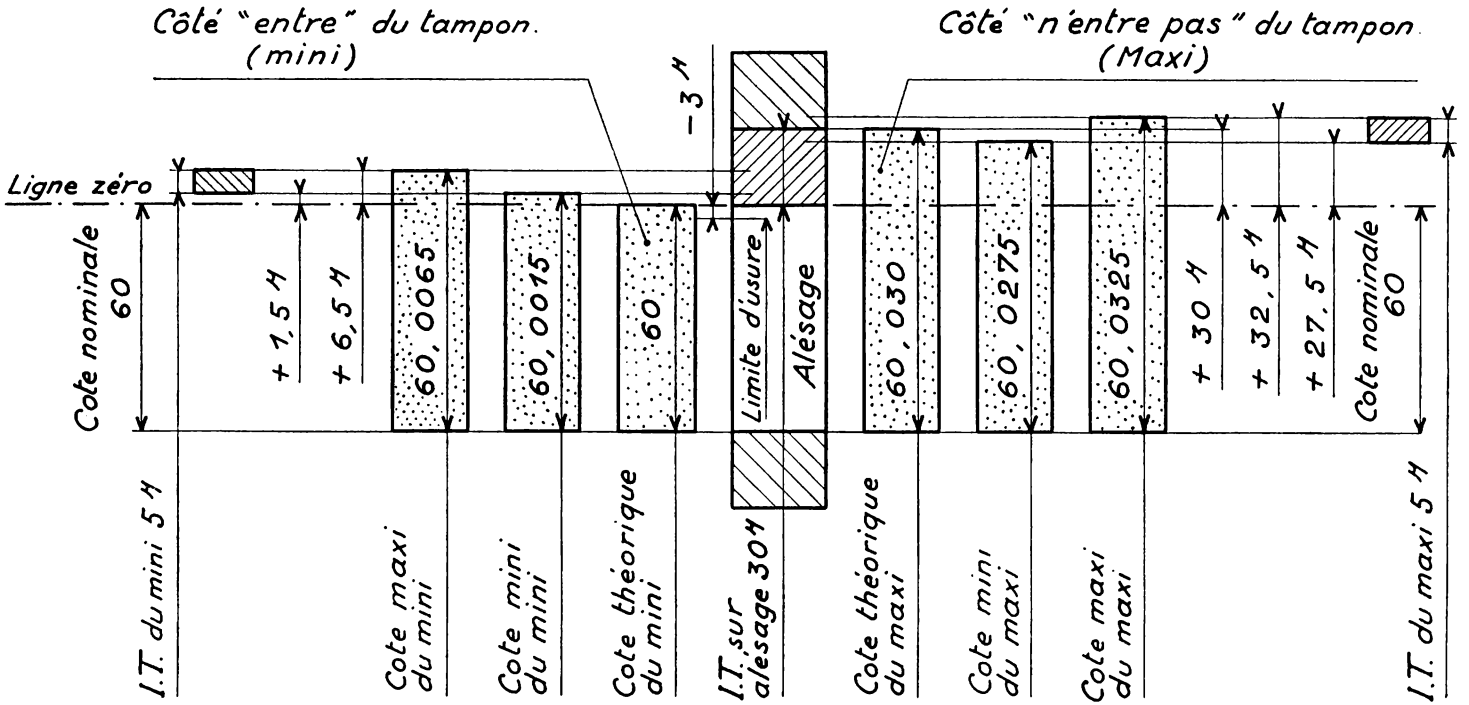


FIG 133 _ *Tolérances de fabrication et limite d'usure d'un tampon lisse 60 H 7.*
Remarquer les tolérances sur la pièce et celles sur chaque côté du tampon ainsi que la limite d'usure qui s'applique au "côté entre" seulement.

Les limites de vérification du tampon admettent, par rapport à la cote nominale, des tolérances de + 1,5 μ à + 6,5 μ. Les cotes limites sont donc :

60,0015 *mm* qui est le mini du mini;

60,0065 *mm* qui est le maxi du mini.

— Pour le côté n'entre pas, les tolérances sont à cheval sur la cote théorique.

Ex. : 1° Un calibre à mâchoires 60 *g* 6 a son mini (côté n'entre pas) à — 29 μ de la cote nominale soit 59,971 *mm* (fig. 132).

Les limites de vérification du calibre admettent, par rapport à la cote nominale, des tolérances de — 26,5 μ à — 31,5 μ. Les cotes limites sont donc :

59,9735 *mm* qui est le maxi du mini;

59,9685 *mm* qui est le mini du mini.

2° Un tampon 60 *H* 7 a son maxi (côté n'entre pas) à + 30 μ de la cote nominale soit 60,030 *mm* (fig. 133).

Les limites de vérification du tampon admettent, par rapport à la cote nominale, des tolérances de + 27,5 μ à + 32,5 μ. Les cotes limites sont donc :

60,0275 *mm* qui est le mini du maxi;

60,0325 *mm* qui est le maxi du maxi.

A ces tolérances s'ajoute, sur le **côté entre** seulement, une **limite d'usure** variable avec la cote nominale et la qualité (3 μ pour 60 *H* 7 et 60 *g* 6) (1).

Dans les exemples précédents le maxi du maxi du calibre 60 *g* 6 peut donc monter jusqu'à

$$59{,}990 + 0{,}003 = 59{,}993 \text{ mm}$$

et le mini du mini du tampon 60 *H* 7 descendre à

$$60 - 0{,}003 = 59{,}997 \text{ mm}$$

A. MOYENS DE CONTROLE D'UN CALIBRE A MACHOIRES

1° A l'aide de rapporteurs. Les rapporteurs sont des disques établis à la cote exacte. Ils sont passés à frottement doux entre les mâchoires, le calibre est posé à plat sur un marbre pour qu'il y ait alignement sans forcer entre les touches et le rapporteur.

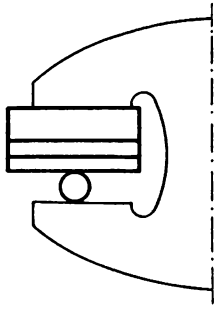


FIG 134 — *Contrôle par cales étalons et piges.*

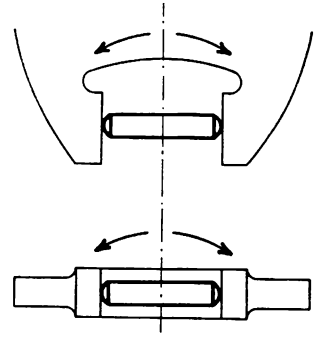


FIG 135 — *Contrôle par étalon à bouts sphériques. Compléter par pivotements.*

(1) On admet en effet que pour qu'un calibre entre sans forcer il faut un jeu de l'ordre de 3 μ.

2° A l'aide de cales étalons. L'empilage de cales donne la cote à vérifier et on opère comme précédemment.

3° A l'aide de cales étalons et de piges. Le contrôle par cales seules peut être faussé par la trop grande étendue du contact. Pour augmenter la sensibilité de l'opération, on intercale donc entre cale et touche une pige cylindrique de haute précision (fig. 134).

4° A l'aide d'étalons à bouts sphériques. Dans ce cas (fig. 135) l'alignement touches-étalon est obtenu par pivotement.

5° A l'aide de cales à gicleurs. Revoir ce procédé qui a été étudié en classe de 3e, sixième leçon.

Nota. Avant le contrôle des cotes, il faut contrôler la planéité des touches au moyen du disque plan étalon en verre (fig. 136).

Si la touche est plane, des franges parallèles, aux couleurs de l'arc-en-ciel, dites franges irisées, apparaissent et sont visibles à l'œil nu.

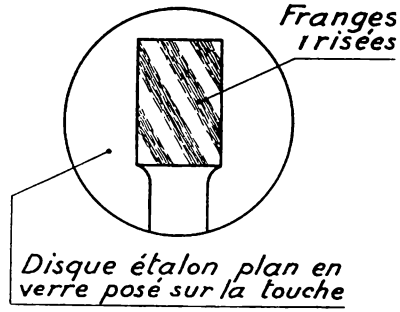


FIG 136 _ *Vérification de la planéité d'une touche au moyen de l'étalon plan en verre.*

B. CONTROLE D'UNE BAGUE LISSE

Le contrôle d'une bague lisse peut être réalisé par cales-étalons et piges cylindriques (fig. 137) ou à l'aide du compas d'intérieur *Solex* (fig. 138).

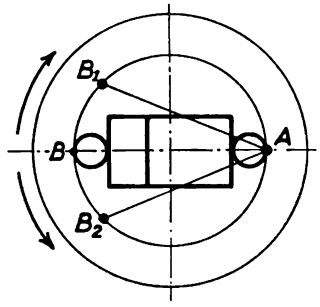


FIG 137 _ *Contrôle par cales et piges cylindriques.*

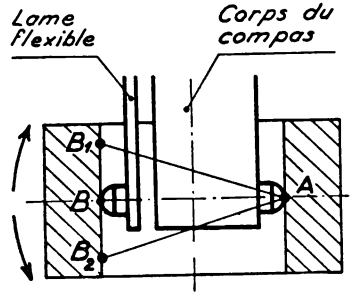


FIG 138 _ *Contrôle au compas d'intérieur "Solex".*

Des mesures répétées suivant plusieurs diamètres et sur la longueur sont nécessaires pour déceler les ovalisations.

Afin d'assurer l'alignement au cours de la mesure, faire pivoter la bague pour obtenir, dans un sens, la plus grande cote (fig. 137 où $\mathbf{AB} > \mathbf{AB}_1$ et $\mathbf{AB}_2$) et, dans

le sens perpendiculaire au premier, la plus petite cote (fig. 138) où $\mathbf{AB} < \mathbf{AB}_1$ et $\mathbf{AB}_2$. Le point **B** est appelé **point de rebroussement.** C'est à ce point que doit se faire la mesure.

C. CONTROLE D'UN TAMPON LISSE

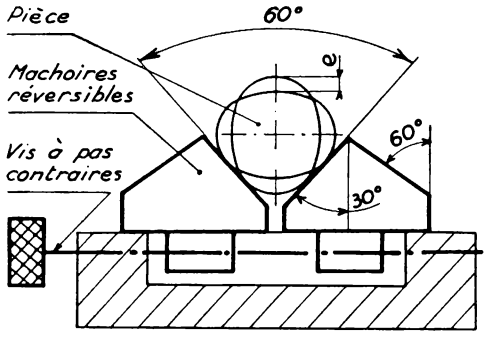


FIG 139 — *Contrôle sur vé à mâchoires réversibles de la forme d'un tampon.*

Le premier contrôle est relatif à la forme. Les défauts sont décelés par un comparateur Solex, le tampon étant monté sur vé à mâchoires réversibles (fig. 139). L'écart de lecture **e** indique qu'il y a ovalisation.

La valeur de **e** est d'autant plus grande que l'angle du vé est plus petit. On peut donc amplifier à volonté.

Le contrôle de la mesure doit être répété en plusieurs points sur la longueur :

— **soit au moyen du comparateur Solex** après étalonnage, le tampon étant monté entre pointes ou sur vé ;

— **soit au moyen d'un micromètre au millième** avec pression contrôlée au comparateur à aiguille et après étalonnage de l'appareil ;

— **soit au moyen des becs spéciaux et d'une monture** accompagnant les boîtes de cales. (Revoir ce procédé étudié en classe de 3e, septième leçon.)

D. CONTROLE D'UNE JAUGE PLATE

Le contrôle peut être effectué suivant les procédés précédemment indiqués pour le contrôle d'un tampon.

La jauge plate présentant moins de surface de contact que le tampon, il faut effectuer un nombre important de mesures et faire la moyenne des lectures.

III. — CONTROLE DES TAMPONS CONIQUES

La conicité pour cent $\mathbf{C}\ \%$ se contrôle à l'aide de cales étalons et de piges (fig. 140).

$$\mathbf{C}\ \% = \frac{\mathbf{C}_2 - \mathbf{C}_1}{\mathbf{h}} \times 100 \text{ d'où } \mathbf{tg}\ \alpha = \frac{\mathbf{C}\ \%}{\mathbf{200}}$$

ce qui permet de calculer l'angle au sommet $\beta = 2\ \alpha$. On a aussi $\mathbf{C}_2 = \mathbf{C}_1 + \mathbf{2\ h\ tg}\ \alpha$ ou encore $\mathbf{C}_2 = \mathbf{C}_1 + \dfrac{\mathbf{h\ C}\ \%}{\mathbf{100}}$

Pour le contrôle de l'angle au sommet, on peut utiliser :

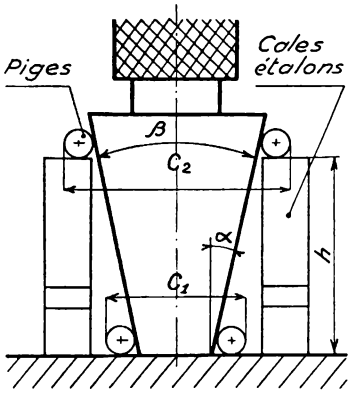


FIG 140_ *Contrôle de la conicité par cales et piges cylindriques.*

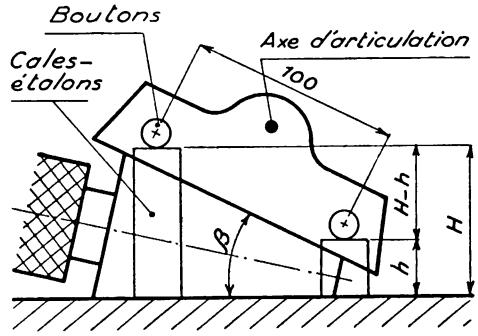


FIG 141 _ *Contrôle de l'angle au sommet à l'aide de la règle sinus.*

1° La règle-sinus (fig. 141) qui porte deux boutons de même diamètre, distants de 100 *mm*, parfaitement parallèles au bord de référence de la règle qui peut s'articuler en son milieu autour d'un axe porté par un support solidaire d'un marbre.

L'inclinaison de la règle, ou angle au sommet du cône, est déterminée par empilage de cales.

On a $\sin \beta = \dfrac{H - h}{100}$

2° L'appareil entre-pointes (fig. 142) équipant le micromètre pneumatique *Solex*.

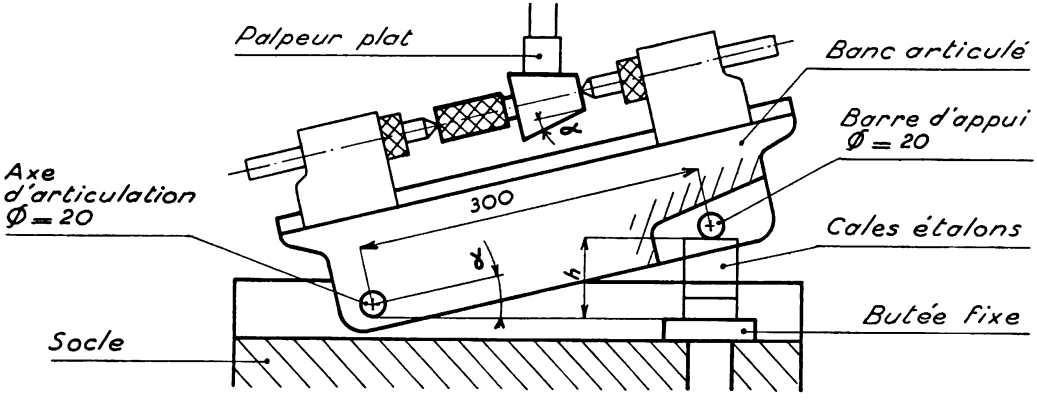


FIG 142 _ *Contrôle de l'angle au sommet, de la concentricité et de la rectitude de la génératrice d'un cône par appareil entre-pointes et comparateur "Solex".*

L'inclinaison du banc porte-pièce sur son socle est déterminée par cales étalons : $\sin \alpha = \frac{h}{300}$. Par rotation du cône, on peut contrôler la concentricité.

Pour vérifier la rectitude de la génératrice du cône on déplace longitudinalement l'appareil guidé par une languette, sous le palpeur.

IV. — CONTROLE DES ÉTALONS

Les étalons d'atelier ont une précision de l'ordre de $\pm$ 0,1 μ, donc plus grande que celle des calibres à limites. Dans le cas de mesure par comparaison, l'étalonnage des instruments de mesure doit se faire à l'aide de cales étalons de laboratoire établies elles-mêmes avec une tolérance de $\pm$ 0,05 μ.

A. CONTROLE DES ÉTALONS PLANS

Ce contrôle se fait à l'interféromètre.

Mais il peut être réalisé au moyen du comparateur *Solex*, les cales étant posées sur table circulaire en vé (fig. 143) ou sur table à larges stries (fig. 144).

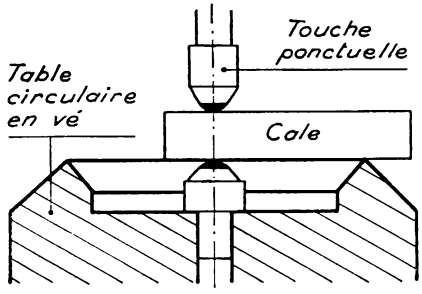


FIG 143 — *Contrôle d'une cale au comparateur "Solex" sur table circulaire en vé.*

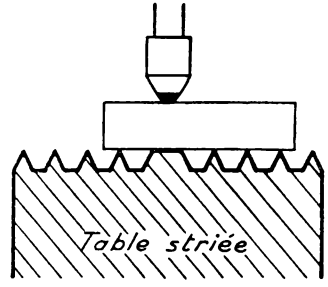


FIG 144 — *Contrôle d'une cale au comparateur "Solex" sur table striée.*

Les stries favorisent la précision de la mesure parce qu'elles constituent des logements pour les corps étrangers, principalement les poussières.

La touche-support centrale de la table en vé ainsi que la bande centrale de la table striée sont en débord de 4 à 5 μ afin que le contact y soit localisé ; la mesure n'est pas faussée par cette disposition puisqu'elle est faite par comparaison.

Une vérification de la planéité au disque plan étalon en verre s'impose avant le contrôle de la dimension.

B. CONTROLE DES ÉTALONS A BOUTS SPHÉRIQUES (fig. 145).

Les étalons à bouts sphériques, ainsi que les broches à bouts sphériques, sont mesurés par un comparateur à touches planes.

L'alignement broche et touches est obtenu par appui de la broche sur une table en vé.

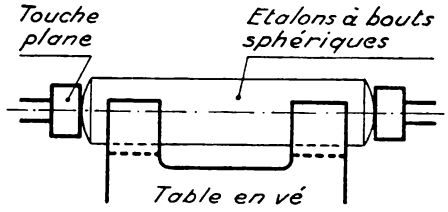


FIG 145 — *Contrôle d'un étalon à bouts sphériques avec comparateur à touches planes.*

V. — CONTROLE DES CALIBRES DE FILETAGE

Ce contrôle sera étudié, en même temps que celui des pièces filetées, dans le cours de la classe de 1re.

Résumé

Un contrôle périodique des vérificateurs à dimensions fixes est nécessaire car il faut en interdire l'emploi dès que la limite d'usure est atteinte.

CONTROLE DES CALIBRES A LIMITES. La position des tolérances est telle que :

- **sur le *côté entre*, l'usure rapproche la cote réelle de la cote théorique, puis la dépasse d'une quantité dite *limite d'usure* variable avec la cote nominale.**
- **sur le *côté n'entre pas*, les tolérances sont à cheval sur la cote théorique.**

Le contrôle des calibres à mâchoires est réalisé à l'aide de disques rapporteurs, de cales étalons et de piges, de broches à bouts sphériques ou de cales à gicleur. Pour le contrôle des bagues lisses on utilise des cales-étalons et piges ou le compas d'intérieur *Solex*.

Le contrôle de tampons nécessite d'abord un contrôle de la forme. Les cotes sont ensuite vérifiées au comparateur *Solex*, au micromètre à pression contrôlée ou avec des becs spéciaux et des cales étalons.

CONTROLE DES TAMPONS CONIQUES. Pour le contrôle de la conicité % on applique la méthode des piges.

$C\,\% = \dfrac{C_2 - C_1}{h} \times 100$ d'où l'on déduit $\text{tg}\ \alpha = \dfrac{C\,\%}{200}$, α étant le demi-angle au sommet du cône.

L'angle au sommet β est vérifié au moyen de la règle-sinus : $\sin \beta = \dfrac{H - h}{100}$ ou de l'appareil entre-pointes *Solex* : $\sin \beta = \dfrac{h}{300}$.

Ce dernier dispositif permet en même temps la vérification de la rectitude de la génératrice et de la concentricité.

CONTROLE DES ÉTALONS.

Planéité, parallélisme et cotes des étalons plans sont contrôlables à l'interféromètre.

Les cotes sont également contrôlables au comparateur *Solex* sur une table circulaire en vé ou sur une table à larges stries, l'étalonnage se faisant sur cales de laboratoire.

Les étalons à bouts sphériques sont vérifiés au micromètre à pression contrôlée primitivement étalonné sur cale de laboratoire.

CINQUIÈME PARTIE

MODE D'ACTION DES OUTILS DE COUPE

Outils d'enveloppe et outils de forme.

Efforts sur les outils.

Ablocage des pièces.

Vitesse de coupe.

Facteurs dont dépend la vitesse de coupe.

Correction de la vitesse de coupe.

Vitesse de coupe pour les carbures métalliques.

MODE D'ACTION DES OUTILS

ÉTUDE DES OUTILS D'ENVELOPPE DONT L'ARÊTE COUPANTE EST CURVILIGNE

I. — GÉNÉRALITÉS

Nous rappelons que pour l'outil d'enveloppe dont l'arête coupante est rectiligne, la valeur des angles caractéristiques est constante en tous points de l'arête coupante et que c'est là une des conditions de la parfaite adaptation de l'outil au travail à exécuter, Nous verrons que lorsque l'arête tranchante est curviligne, cette condition n'est plus respectée.

Lorsque la face d'attaque est plane et la face en dépouille courbe, **la projection de l'arête coupante sur le plan de base est aussi une courbe et l'arête coupante est curviligne** (fig. 146).

La courbe de projection est appelée profil de l'outil.

Sur un tel outil, la valeur des angles caractéristiques se mesure dans la section obtenue par un plan de trace normale à l'arête coupante et au plan de base.

L'angle γ est l'angle d'obliquité du profil correspondant au point $\mathbf{P}_1$ pris sur le profil de l'outil.

Si nous considérons plusieurs sections faites suivant des angles d'obliquité du profil différents, nous constatons que l'angle de pente effective de coupe varie et qu'il passe par une valeur maximum. Cette valeur est mesurée par l'angle de plus grande pente du plan de la face d'attaque par rapport au plan de base.

Le point de l'arête coupante qui lui correspond étant désigné par $\mathbf{P}_1$ (fig. 146) nous nous proposons de calculer la valeur de l'angle de pente effective de coupe correspondant à un autre point, $\mathbf{P}_2$ par exemple.

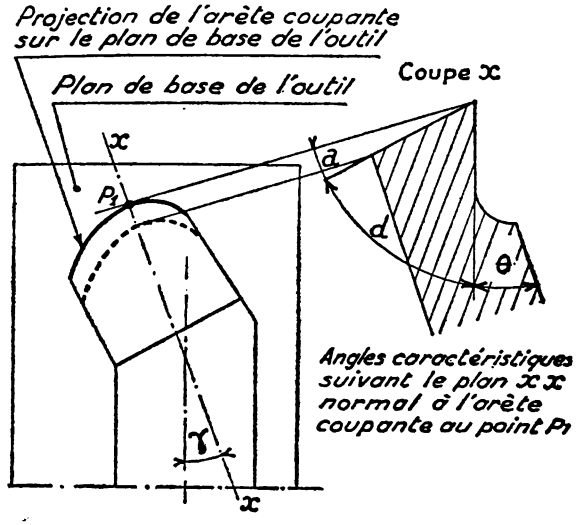


FIG 146 — *Outil dont l'arête coupante est curviligne.*

II. — DROITE DE PLUS GRANDE PENTE

A. DÉFINITION

La droite de plus grande pente d'un plan incliné sur le plan horizontal est la droite qui, tracée sur le plan incliné, est normale à l'intersection des deux plans.

La droite $\mathbf{P_1 M}$ (fig. 147) normale à l'intersection $\mathbf{m\ n}$ est la droite de plus grande pente du plan incliné. Son angle de pente θ a même valeur que l'angle de pente du plan.

On a $\text{tg}\ \theta = \dfrac{\mathbf{P\,P'}}{\mathbf{P'\,M}}$ (1)

B. VALEUR DE L'ANGLE DE PENTE EFFECTIVE DE COUPE

L'angle d'obliquité γ' (fig. 147) correspondant au point $\mathbf{P_2}$ de l'arête tranchante coupe l'intersection $\mathbf{m\ n}$ du plan de base et du plan d'attaque au point $\mathbf{N}$. L'angle $\theta' = \mathbf{P\,N\,P'}$ est l'angle de pente correspondant.

On a $\text{tg}\ \theta' = \dfrac{\mathbf{P\,P'}}{\mathbf{P'\,N}}$ (2)

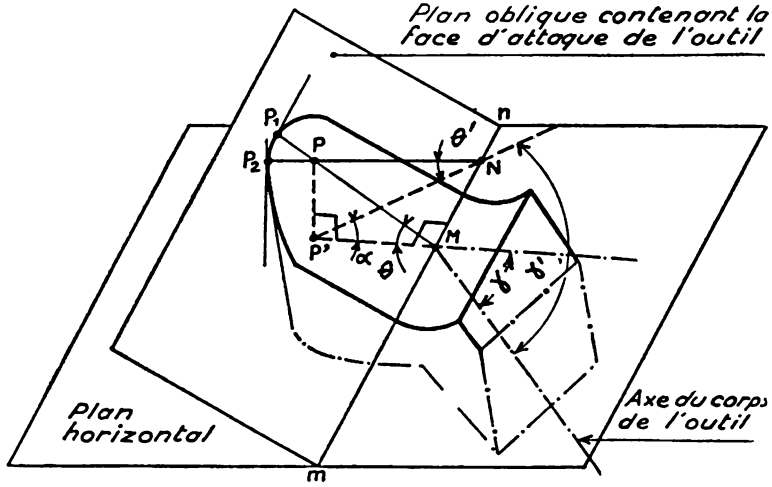


FIG 147 — *Droite de plus grande pente et valeur de l'angle de pente effective de coupe* θ

Cet angle est inférieur à θ puisque $\text{tg}\ \theta = \dfrac{\mathbf{P\,P'}}{\mathbf{P'\,M}}$ (1) et que $\mathbf{P'\,N}$ (oblique) est supérieur à $\mathbf{P'\,M}$ (perpendiculaire).

D'autre part, dans le triangle rectangle $\mathbf{M\,N\,P'}$ on a :

$$\cos\ \alpha = \frac{\mathbf{P'\,M}}{\mathbf{P'\,N}} \text{ d'où } \mathbf{P'\,N} = \frac{\mathbf{P'\,M}}{\cos\ \alpha} \text{ et}$$

$$\text{tg}\,\theta' = \frac{PP'}{\left(\frac{P'M}{\cos\alpha}\right)} = \frac{PP'}{P'M} \times \cos\alpha = \text{tg}\,\theta \cos\alpha \qquad (3)$$

Comme $\cos\alpha$ est inférieur à 1, cette relation nous montre encore que θ' est inférieur à θ.

Les angles d'obliquité du profil γ et γ' ont pour différence l'angle α. On a donc $\alpha = \gamma' - \gamma$.

Le calcul de l'angle θ' se fait donc en fonction de θ et de la différence $\gamma' - \gamma$. On aura : $\text{tg}\,\theta' = \text{tg}\,\theta \cos(\gamma' - \gamma)$

Dans le cas d'un outil droit, $\gamma = 0$ et $\text{tg}\,\theta' = \text{tg}\,\theta \cos\gamma'$

C. CONCLUSION

Pour un outil à profil curviligne, l'angle de pente effective de coupe varie en tous les points de l'arête coupante.

La coupe de l'outil est optimum sur un seul point de l'arête coupante (point P_1 dans les fig. 147 et 148).

Le calcul précédent permettra de connaître les valeurs limites de θ' et, par suite, les possibilités de travail correct de l'outil.

D. REMARQUES TRÈS IMPORTANTES.

1° L'angle θ formé par la droite de plus grande pente **PM** et sa projection **P'M** sur le plan de base correspond à l'angle de pente d'affûtage **b**. Donc $b = \theta$ (fig. 147).

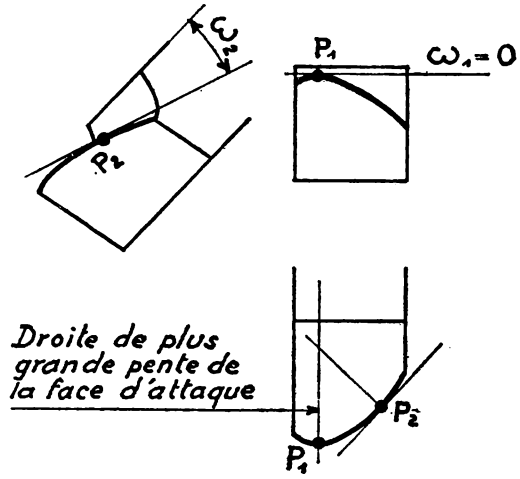


FIG 148 — *Les angles ω_1 et ω_2 marquent l'obliquité de l'arête coupante aux points P_1 et P_2.*

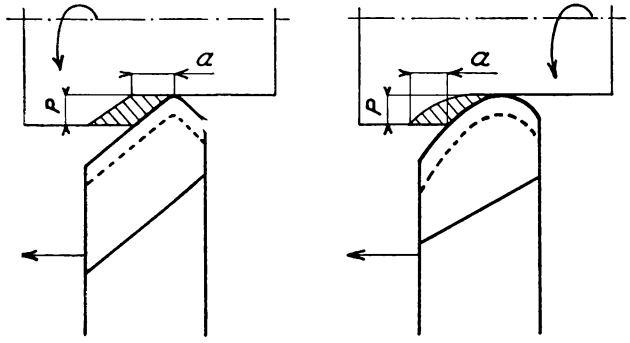


FIG 149 — *Comparaison du travail par arête coupante rectiligne et par arête coupante curviligne.*

2° L'angle γ formé par la projection **P'M** de la droite de plus grande pente et une parallèle aux génératrices du corps de l'outil correspondant à l'angle de direction **C** de l'outil. Donc $C = \gamma$.

3° Dans l'étude faite à la 24e leçon, l'angle **b** désigne simultanément l'angle de pente d'affûtage et la pente effective de coupe maximum parce que l'angle de direction est nul.

4° Tout outil dont le profil est curviligne et la face d'attaque plane a une arête coupante oblique d'inclinaison variable (fig. 148).

5° A conditions de travail égales, la chaleur dégagée au cours du travail se diffuse plus facilement dans le corps de l'outil lorsque l'arête est curviligne car la masse terminale plus importante laisse un plus gros passage (fig. 149).

6° L'épaisseur du copeau étant très mince aux environs immédiats du bec de l'outil (fig. 149), l'arête coupante s'use moins vite et la tendance au broutement diminue.

D'autre part, les sillons laissés par l'outil sont peu prononcés. La surface usinée présente donc un plus bel aspect et les défauts microgéométriques sont moins importants.

ÉTUDE DES OUTILS DE FORME

I. — GÉNÉRALITÉS

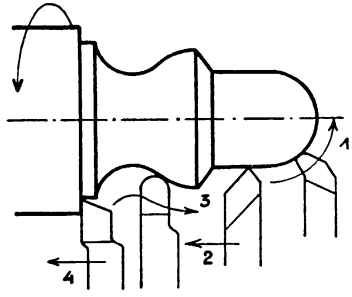


FIG 150 — *Mise en forme à l'aide de plusieurs outils d'enveloppe.*

Soit à exécuter le gland terminal d'une boîte d'étau à pied (fig. 150).

Un tel profil de pièce, exécuté à l'aide d'outils d'enveloppe courants, exige plusieurs changements d'outils. Les trajectoires particulières à chacun d'eux ne sont pas toutes réalisées par guidage mécanique (fig. 150, trajectoires 1 et 3).

En conséquence, la mise en forme et le respect des cotes seront obtenus par tâtonnement et avec difficulté et, sur une série de mêmes pièces, il n'y aura pas homogénéité parfaite de la fabrication (1).

Il est possible de faciliter le travail, d'en augmenter la précision et d'en diminuer le prix, en opérant à l'aide d'un outil de forme (fig. 151) dont la trajectoire est perpendiculaire à l'axe de la pièce.

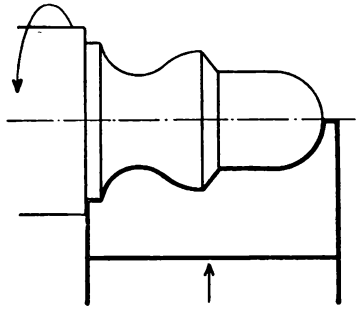


FIG 151 — *Mise en forme à l'aide d'un seul outil de forme.*

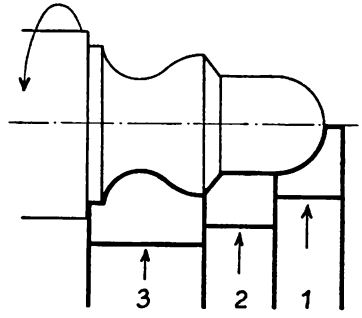


FIG 152 — *Mise en forme à l'aide de plusieurs outils de forme.*

(1) La fabrication de cette forme non fonctionnelle ne demande pas une grande précision. Nous ne la citons en exemple que parce qu'elle justifie l'intervention de plusieurs outils de forme.

Mais, lorsque la longueur de l'arête coupante en prise est trop importante, l'effort de coupe devient trop grand (voir 25e leçon). On opère alors avec plusieurs outils de forme (fig. 152) agissant alternativement suivant des trajectoires perpendiculaires à l'axe de la pièce, donc réalisables par guidage mécanique.

Remarque. Dans l'emploi de l'outil de forme, l'enfoncement de l'outil correspond à l'**avance** tandis que le **serrage** est l'équivalent de la longueur de l'arête coupante.

II. — ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE D'UN OUTIL DE FORME

A. DIFFÉRENTES DÉPOUILLES

Pour qu'un outil travaille rationnellement il doit présenter une dépouille effective en tout point de son arête coupante (fig. 153 et 154). La dépouille effective se mesure sur une section normale à l'arête coupante en ce point. Dans la figure 153 la dépouille α s'appelle **dépouille frontale,** la dépouille β s'appelle **dépouille latérale.**

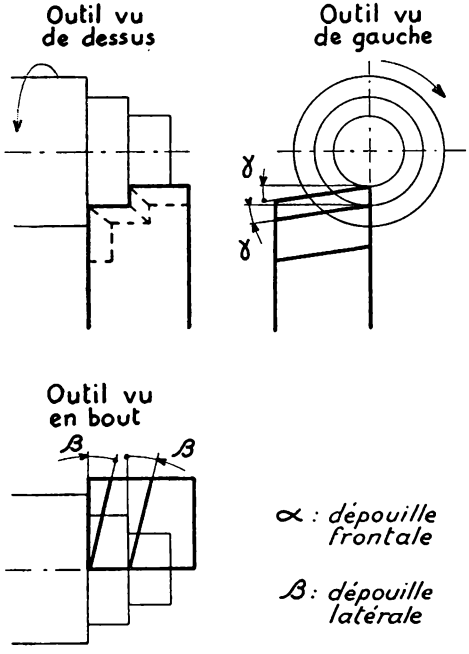


FIG 153 _ *Outil de forme et ses différentes dépouilles.*

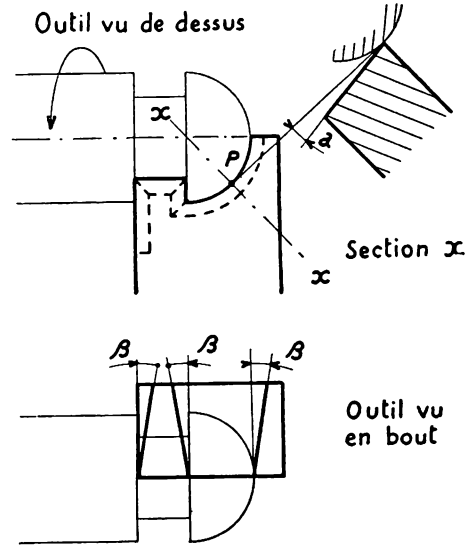


FIG 154 _ *Outil de forme et ses différentes dépouilles.*

Si le profil est celui de la figure 154 on remarque qu'en certains points (point **P** par exemple) la dépouille effective **a** tient à la fois de la dépouille frontale et de la dépouille latérale.

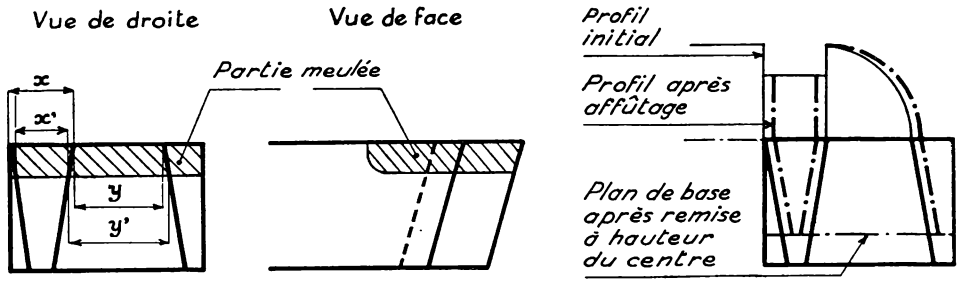
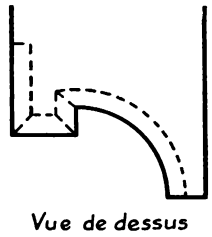


FIG 155 _ *Après affûtage de l'outil sur sa face d'attaque, le profil de l'outil et le profil de la pièce sont modifiés.*



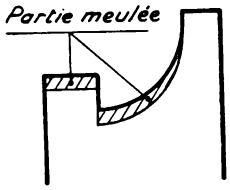


FIG 156 _ *Affûtage sur le profil.*

B. OUTILS PROFILÉS

L'outil de la figure **154** est un outil **profilé droit,** droit parce que pris dans la barre.

Pour son affûtage, si l'on meule la face d'attaque (fig. 155), la cote **x** diminue jusqu'en **x'** tandis que la cote **y** augmente jusqu'en **y'**, ce qui a pour résultat de modifier la forme et les cotes de la partie usinée.

Pour conserver le profil initial il faut affûter suivant la figure 156. Mais cet affûtage est difficile, parfois même impossible.

Les deux inconvénients ci-dessus expliquent pourquoi les outils profilés sont de plus en plus évités.

C. OUTILS A PROFIL CONSTANT

Pour l'outil à profil constant, **le profil** déterminé par l'intersection de la surface en dépouille, construite une fois pour toutes, et de la face d'attaque, sur laquelle s'opère l'affûtage, **reste invariable lorsqu'on meule la face d'attaque parallèlement à elle-même.**

L'outil de la figure 157 est à la fois un outil profilé et un outil à profil constant. Après affûtage sur la face d'attaque (fig. 157) la cote **x** ne variera pas, **x'** = **x**, à condition que la dépouille latérale soit de même valeur sur les flancs.

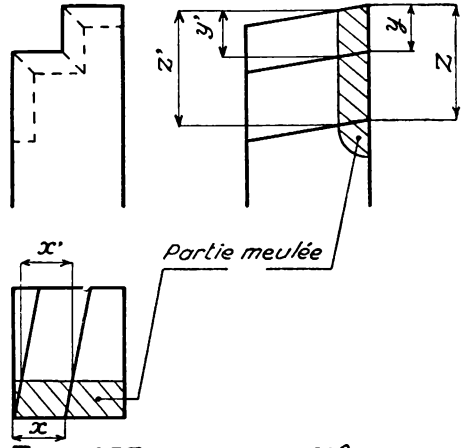


FIG 157 _ *Après affûtage sur la face d'attaque le profil n'est pas modifié.*

Si la même condition est remplie pour la dépouille frontale les cotes y' et z' après affûtage seront égales aux cotes initiales y et z.

Donc, la forme et les cotes de la pièce usinée ne seront pas modifiées après affûtage de l'outil. Mais il est indispensable, pour que cette condition soit remplie, que la pente d'affûtage conserve une valeur constante.

Les outils des figures 158 et 159 sont des outils à profil constant.

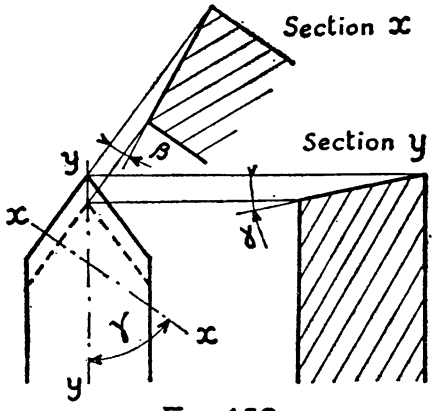


FIG 158

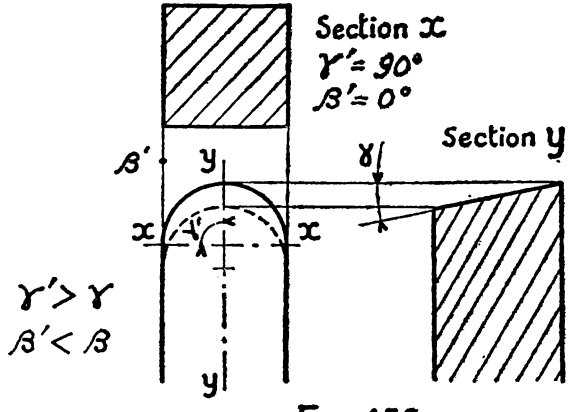


FIG 159

L'angle de dépouille latérale β diminue au fur et à mesure que l'angle d'obliquité du profil γ augmente : β < α

On remarquera que, pour les deux, la dépouille latérale β est plus faible que la dépouille frontale α. Pour l'outil de la figure 158 le respect de la dépouille latérale de 6° conduirait à une grande fragilité de la pointe.

Pour l'outil de la figure 159, il en résulterait une impossibilité de réalisation du profil constant. On est donc contraint d'accepter un angle de dépouille latérale $\beta = 0$ pour l'angle d'obliquité du profil $\gamma' = 90°$.

Résumé

OUTIL A ARÊTE COUPANTE CURVILIGNE. Le profil d'un outil est curviligne lorsque la projection de l'arête coupante sur le plan de base est une courbe.

Dans ce type d'outil, la valeur de la pente effective de coupe change pour tous les points de l'arête coupante.

La pente effective maximum θ est celle qui correspond à la droite de plus grande pente contenue dans la face d'attaque. Toute autre pente θ' se calcule en fonction de l'angle d'obliquité du profil et de la pente maximum.

$$\text{tg } \theta' = \text{tg } \theta \times \cos \gamma' - \gamma$$

OUTIL DE FORME. L'outil de forme a un profil identique à celui de la pièce à obtenir. Si la longueur de l'arête coupante est trop importante, l'outil peut être réalisé par juxtaposition de plusieurs autres.

On distingue les *outils profilés* et les *outils à profil constant.*

Les premiers sont à éviter, sauf pour les petites séries, en raison de leur affûtage difficile et de la variation de leur profil après affûtage.

Les outils à profil constant ne s'affûtent que sur leur face d'attaque et parallèlement à elle-même. Leur dépouille, construite une fois pour toutes, est telle que l'affûtage ne modifie pas leur profil. Il en résulte que cette dépouille diminue quand l'angle d'obliquité du profil augmente. Elle est nulle pour un angle d'obliquité de 90°, ce qui ne répond plus aux conditions de coupe optima de l'outil.

MODE D'ACTION DES OUTILS (Suite)

ÉTUDE DES OUTILS A PROFIL CONSTANT

On distingue deux types d'outils à profil constant : **l'outil prismatique** et **l'outil molette.**

I. — OUTILS PRISMATIQUES

Ces outils sont taillés dans des barreaux d'acier de bonne qualité **(A. R. E. S.)** (1) puis rectifiés après trempe. Pour leur emploi, ils sont pincés dans des porte-outils auxiliaires.

Étudions un tel outil pour filetage triangulaire S. I.

A. L'OUTIL N'A PAS DE PENTE D'AFFUTAGE (fig. 160)

La construction de l'outil est établie d'après l'angle α de sa section droite, que nous allons calculer.

On a : $\text{tg}\,\frac{\alpha}{2} = \frac{IE}{IF}$ et

$$\text{tg}\,\frac{\beta}{2} = \frac{D'H}{D'A'} ;$$

D'autre part

$$IF = DB = DA \cos a_f ;$$

$$IE = D'H \text{ et } DA = D'A'$$

Donc $\text{tg}\,\frac{\alpha}{2} = \frac{D'H}{D'A' \cos a_f} =$

$$\text{tg}\,\frac{\beta}{2} \times \frac{1}{\cos a_f} = \frac{\text{tg}\,\frac{\beta}{2}}{\cos a_f} \qquad (1)$$

$$\text{Or } \frac{\beta}{2} = \frac{60^o}{2} = 30^o$$

a_f est la dépouille frontale qui varie d'après la dépouille latérale a_l qui, normalement vaut 6°.

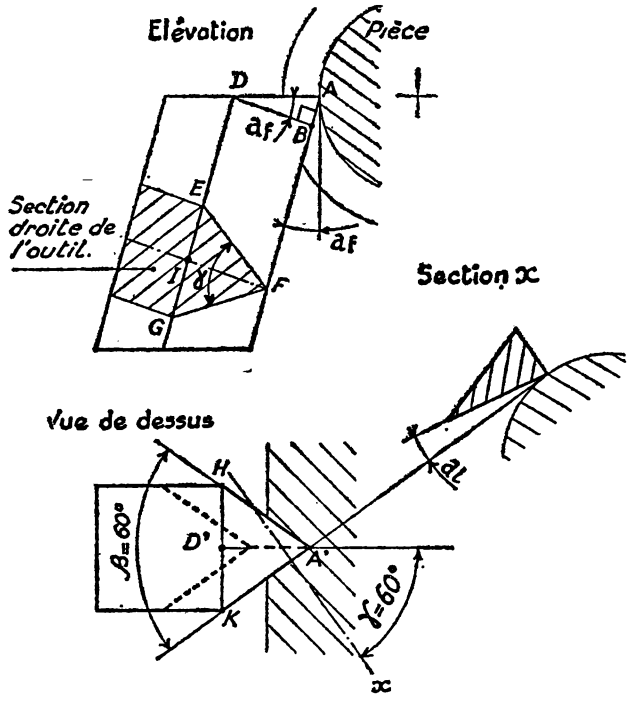


FIG 160. — *Etude d'un outil à profil constant prismatique sans pente d'affûtage.*

(1) Acier rapide extra supérieur.

De la relation $\mathbf{tg\ a_1 = tg\ a_f \cos \gamma}$ (voir leçon précédente) on tire :

$$\mathbf{tg\ a_f} = \frac{\mathbf{tg\ a_1}}{\mathbf{\cos \gamma}} = \frac{\mathbf{tg\ 6^o}}{\mathbf{\cos 60^o}} = \frac{0{,}105}{0{,}5} = 0{,}210 \text{ d'où } \mathbf{a_f} = 12^o$$

Portant cette valeur dans (1) il vient :

$$\mathbf{tg}\ \frac{\alpha}{2} = \frac{\mathbf{tg\ 30^o}}{\mathbf{\cos 12^o}} = \frac{0{,}577}{0{,}978} = 0{,}590 \text{ d'où } \frac{\alpha}{2} = 30^o\,30' \qquad \text{et enfin} \qquad \alpha = 61^o$$

B. L'OUTIL A UNE PENTE D'AFFUTAGE

Une pente d'affûtage facilite la coupe et entraîne une modification du profil qu'il faut corriger.

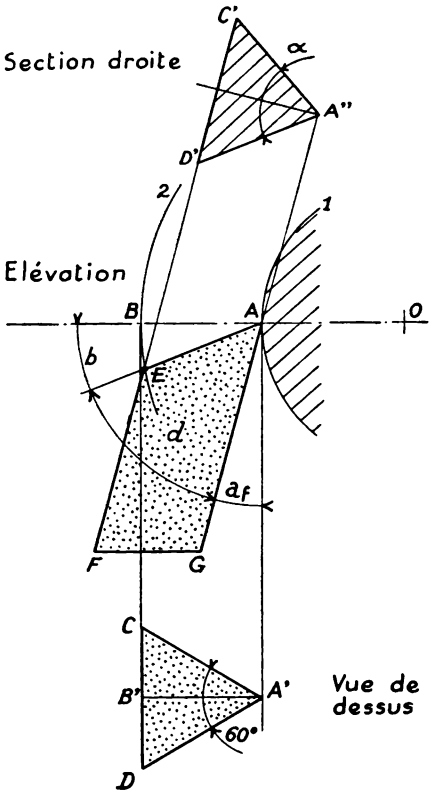


FIG 161 — *Détermination graphique de l'angle de construction d'un outil prismatique à fileter avec pente d'affûtage.*

Il est possible de déterminer la valeur de l'angle de la section droite de l'outil par le calcul mais il est aussi intéressant de l'obtenir par une épure à grande échelle dont nous donnons la marche de construction (fig. 161) :

- se fixer d'abord les valeurs de $\mathbf{a_f}$ et de $\mathbf{b}$; soit $\mathbf{a_f} = 12^o$ et $\mathbf{b} = 15^o$ par exemple ;
- tracer les deux arcs **1** et **2** représentant à grande échelle le fond et le sommet d'un filet engendré par un triangle sans troncatures ;
- sur $\mathbf{A'B'}$, projection de $\mathbf{AB}$, construire le triangle équiangle, ou équilatéral, $\mathbf{A'CD}$ de hauteur $\mathbf{A'B'}$;
- sur $\mathbf{FE}$, ou sur son prolongement, porter $\mathbf{C'D' = CD}$. La perpendiculaire au milieu de $\mathbf{C'D'}$ coupe $\mathbf{GA}$ ou son prolongement en $\mathbf{A''}$;
- tracer $\mathbf{C'A''}$ et $\mathbf{D'A''}$ pour obtenir l'angle α de construction du profil de l'outil (section droite).

Nota. Il résulte de cette étude que le positionnement et l'affûtage de l'outil ne doivent pas modifier sa dépouille ni sa pente d'affûtage d'origine.

II. — OUTILS MOLETTES

Ce type d'outil est constitué par un **disque** d'acier, toujours de haute qualité, rectifié après trempe.

L'outil-molette supporte un grand nombre d'affûtages tout en se présentant sous un petit volume.

Un porte-outil auxiliaire assure son montage sur la tourelle porte-outils de la machine.

A. OUTIL-MOLETTE POUR FILETAGE TRIANGULAIRE SANS PENTE D'AFFUTAGE (fig. 162).

1° Positionnement de l'outil. Le centre **O** de la molette doit être plus haut que le centre **O'** de la pièce afin d'assurer une dépouille effective $\mathbf{a}_f$.

Le décalage des centres se calcule d'après la relation $\mathbf{OB = OA \sin a_f = R \sin a_f}$.

2° Détermination du profil de l'outil. L'angle α du profil de la molette peut être calculé ou déterminé graphiquement. La figure 162 indique la résolution graphique du problème pour un outil sans pente d'affûtage.

La distance **D** étant une oblique par rapport au rayon **OA**, est plus grande que **D'** et l'on conçoit aisément que $\alpha > \beta$ puisque l'épaisseur **e** est constante.

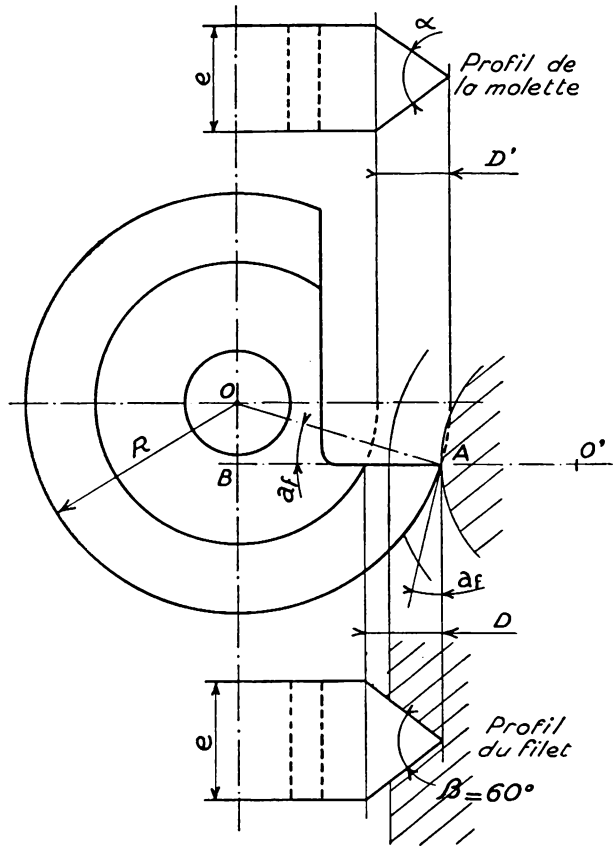


FIG 162 — *Détermination graphique de l'angle de construction d'un outil-molette pour filet triangulaire S.I.*

B. OUTIL-MOLETTE SANS PENTE D'AFFUTAGE POUR GORGE DEMI-CIRCULAIRE

Nous étudierons cet outil parce qu'il présente la particularité suivante : selon le point considéré sur l'arête coupante, l'angle d'obliquité du profil peut varier de 0° jusqu'au maximum de 90°.

De même que pour l'outil-molette à fileter, le centre de l'outil doit être situé au-dessus de celui de la pièce.

1° Variation de l'angle de dépouille (fig. 163). La dépouille varie en tous points de l'arête coupante. En effet :

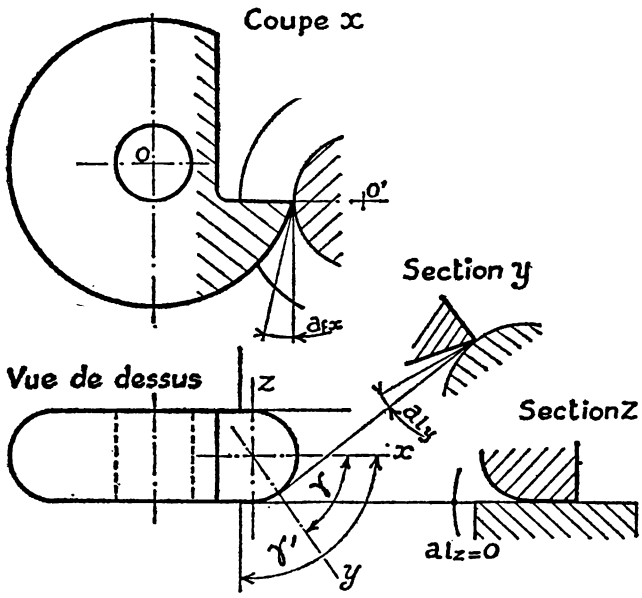


FIG 163 _ *Variation de la dépouille d'un outil-molette à gorge demi-circulaire.*

Pour un angle de direction nul (coupe x), la dépouille frontale $\mathbf{a}_{fx}$ est maximum.

Suivant l'angle d'obliquité γ (section y), la dépouille latérale $\mathbf{a}_{ly}$ est :

$\mathbf{tg}\ \mathbf{a}_{ly} = \mathbf{tg}\ \mathbf{a}_{fx} \cos \gamma$. Pour $\gamma = 60^o$ et $\mathbf{a}_{fx} = 6^o$ on a $\mathbf{tg}\ \mathbf{a}_{ly} = \mathbf{tg}\ 6^o \times \cos 60^o = 0{,}105 \times 0{,}5 = 0{,}0525$ et $\mathbf{a}_{ly} = 3^o$ ce qui assure encore une dépouille convenable.

Suivant l'angle d'obliquité γ' (section z) on a : $\mathbf{tg}\ \mathbf{a}_{lz} = \mathbf{tg}\ \mathbf{a}_{fx} \cos \gamma'$ mais $\cos \gamma' = 0$ donc $\mathbf{tg}\ \mathbf{a}_{lz} = 0$ et $\mathbf{a}_{lz} = 0$. L'outil coupe mal en cette région et il y a arrachement de métal.

Ceci met en évidence ce que la pratique révèle, à savoir que dans l'établissement d'un profil de forme, il faut éviter autant que possible des raccordements donnant un angle d'obliquité du profil supérieur à 60°

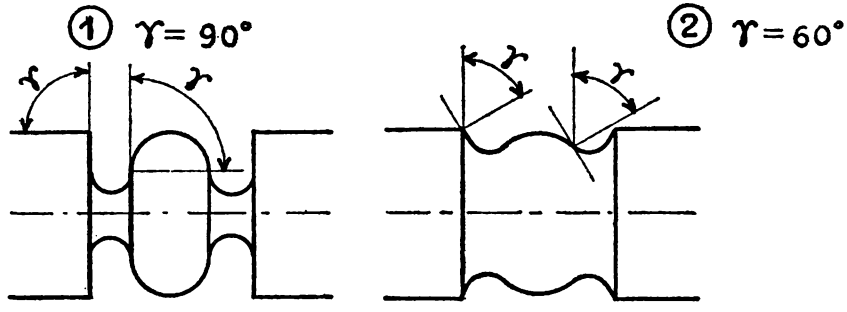


FIG 164 _ *Substitution d'une forme à une autre pour ramener l'angle d'obliquité du profil de 90° à 60°*

Ex. : a) Si la forme 1 (fig. 164) n'est pas strictement nécessaire pour le fonctionnement de l'organe, il y a intérêt à la remplacer par la forme 2 ou une autre forme approchée.

b) Dans le cas de réalisation d'épaulements (fig. 165) donner à l'outil une pénétration oblique. Ainsi l'angle d'obliquité du profil passe de 90° (1) à 45° par exemple (2).

Dans cette position particulière, l'outil attaque chaque surface avec le même angle de dépouille latérale dont la valeur est donnée par $\mathbf{tg}\ \mathbf{a}_l = \mathbf{tg}\ \mathbf{a}_f \times \cos 45^o$.

2° Profil de la molette. Le profil de la molette est déterminé par une épure. Nous traiterons un cas analogue dans le paragraphe suivant.

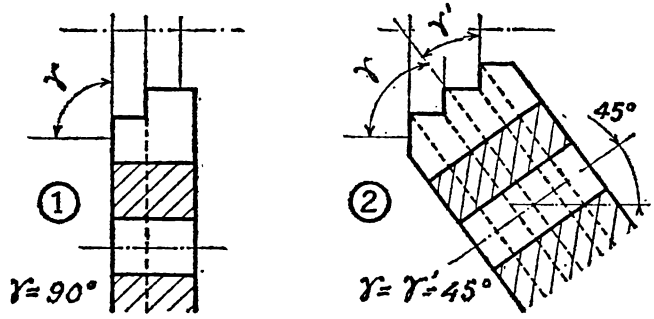


FIG 165 — *Une pénétration oblique diminue la valeur de l'obliquité du profil.*

C. OUTIL POUR GORGE DEMI-CIRCULAIRE AVEC PENTE D'AFFUTAGE

1° Variation de l'angle de dépouille. Tout ce qui a été dit pour l'outil précédent reste valable et applicable.

2° Détermination du profil de l'outil. Soit l'outil de la figure 166.

Le profil de sa face d'attaque n'est pas le même que celui de la gorge puisque **A C** est une oblique par rapport à **A B** tandis que les distances 1.2, 1''.2'' sont égales à **e**.

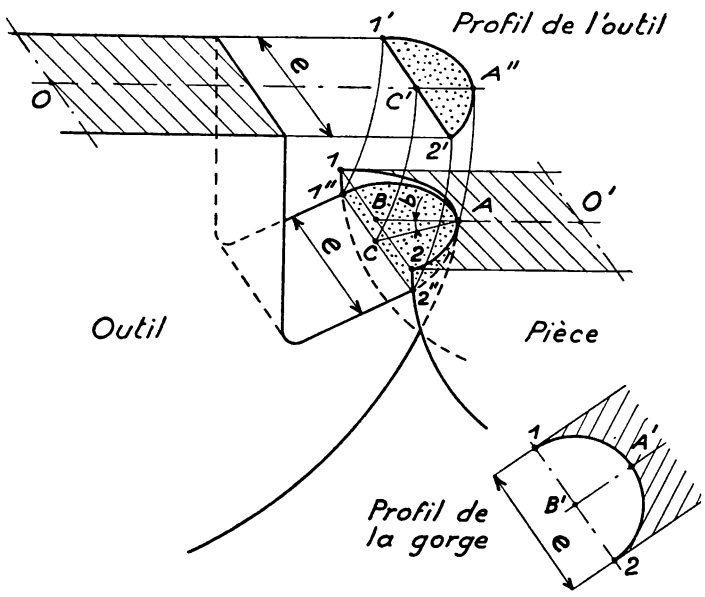


FIG 166 — *Outil-molette avec pente d'affûtage pour gorge demi-circulaire.*

D'autre part, les lieux des points 1'', 2'' et **A** sont les cercles décrits du centre de la molette et passant par ces points. Or 1''.2'' = 1.2 = **e** et **A'' C'' < A B**

Donc, le profil de la molette **ne peut pas être** celui d'une demi-circonférence de rayon B' A' = B A.

La figure 167 indique la façon d'opérer pour déterminer le profil de la molette :

— tracer à grande échelle la vue de face outil-pièce et la projection de la gorge de rayon **B' A' = B A**;

— partager **B A** en 5 parties égales par exemple, et de **O'** comme centre tracer les arcs **K D, L E, M F** et **N G**;

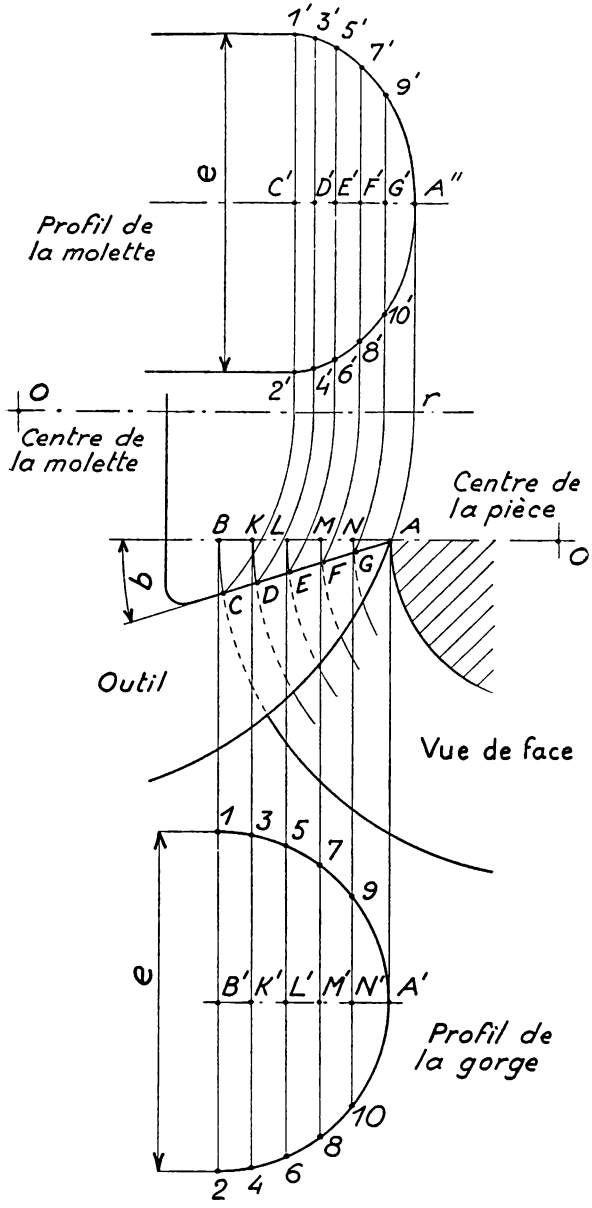


FIG 167 _ *Epure du profil de l'outil-molette.*

— mener sur **B' A'** les projections des points **K, L, M** et **N**;

— de **O** comme centre, tracer les arcs qui passent par **C, D, E, F, G, A** jusqu'à leur rencontre avec le rayon horizontal **o r** et les prolonger par des perpendiculaires à ce rayon. On obtient les points **C', D', E', F', G'** et **A''**;

— porter les distances 1'.2', 3'.4'... 9'.10' égales à 1.2, 3.4... 9.10 puis raccorder ces points. On a ainsi le profil de l'outil.

Remarques. 1° L'épure montre que le profil de la molette change pour des diamètres de pièce différents. Si **O' B** diminue ou augmente, les points **C, D, E, F** et **G** n'occupent plus la même position sur la face d'attaque de l'outil et il en est de même des points **C', D', E', F'** et **G'**.

2° Dans le cas de petite série, l'outil peut être constitué par un **grain** tronconique (fig. 168).

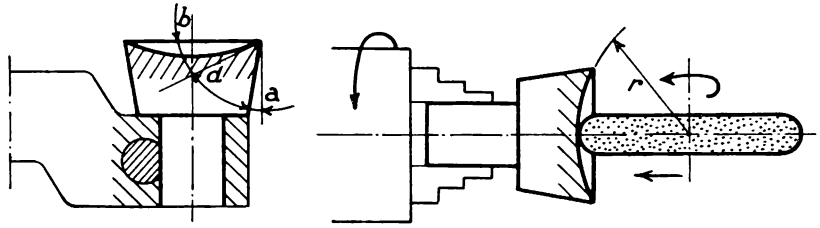


FIG 168 _ *Outil à grain tronconique et son affûtage.*

Ainsi la dépouille est régulière. L'affûtage assure une pente également régulière et il en résulte ainsi un très bon travail de l'outil.

Un seul inconvénient, valable d'ailleurs pour tous les outils à gorge demi-ronde : le copeau est gêné dans son écoulement car chaque partie du copeau s'écoule suivant un rayon de la courbe et se refoule sur les parties voisines (fig. 169).

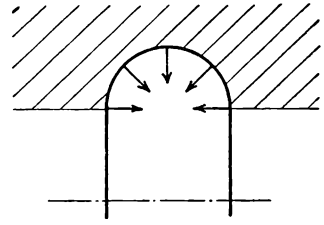


FIG 169 _ *Les rayons d'écoulement sont convergents.*

D. FRAISES DE FORME A PROFIL CONSTANT

Ces outils (fig. 170) dérivent de l'outil-molette.

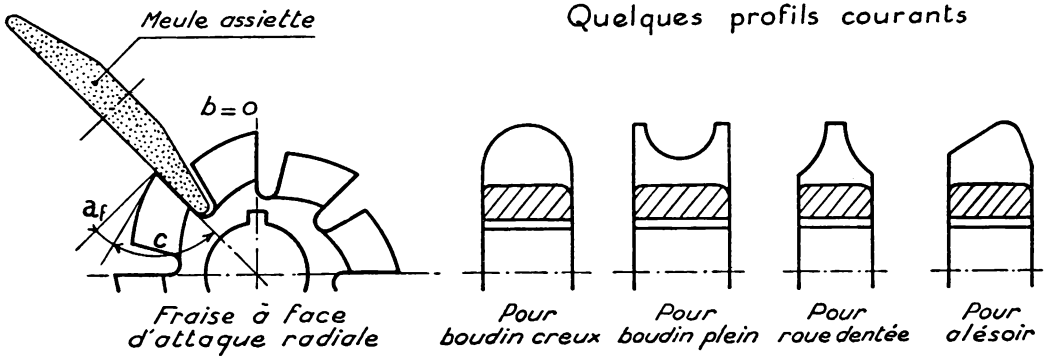


FIG 170 _ *Fraises de forme à profil constant.*

La face en dépouille est déterminée par le glissement du contour du profil de la face d'attaque sur une spirale logarithmique.

Ils peuvent être avec ou sans pente d'affûtage.

L'affûtage se pratique toujours sur la face d'attaque.

Résumé

Les outils à profil constant sont de deux types :

OUTILS PRISMATIQUES. Constitués par des barreaux traités et rectifiés, ils peuvent être avec ou sans pente d'affûtage.

Dans le cas où l'outil n'a pas de pente, le profil de sa section droite dépend seulement de l'angle de dépouille frontale a_f. La relation suivante permet son établissement : $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{\cos a_f}$ dans laquelle :

α = angle de la section droite de l'outil,

β = angle du profil de la pièce.

Le profil de construction de l'outil peut également être déterminé par une épure.

La dépouille latérale a_l, variable en chaque point de l'arête coupante, dans le cas d'un profil courbe, est donnée par la relation :

$$\operatorname{tg} a_l = \operatorname{tg} a_f \times \operatorname{Cos} \gamma$$

Une valeur trop faible de cette dépouille provoque des arrachements à la coupe.

OUTILS-MOLETTES. Ils se présentent sous forme de disques dont le profil est déterminé par l'épure.

Pour tous les outils avec pente d'affûtage, dans le cas de travaux de tournage, le diamètre de la pièce influe sur la détermination du profil de l'outil. Un outil n'est donc valable que pour un même diamètre de pièce. C'est l'inconvénient des outils avec pente d'affûtage.

L'affûtage des outils ne doit jamais modifier la valeur de l'angle de pente d'affûtage et leur positionnement ne doit pas entraîner une variation de l'angle de dépouille afin que le profil de la pièce soit inchangé.

MODE D'ACTION DES OUTILS (Suite)

EFFORTS SUR LES OUTILS

La formation du copeau résulte de la rupture du métal sous un effort de compression (voir classe de 3e, quatorzième leçon).

Le détachement du copeau s'effectue donc sous l'influence simultanée de l'action de la pièce sur l'outil, soit d'efforts subis par l'outil, et de la réaction de l'outil sur la pièce, soit d'efforts subis par la pièce.

I. — ACTION DE LA PIÈCE SUR L'OUTIL, RÉACTION DE L'OUTIL SUR LA PIÈCE

A. TOURNAGE, RABOTAGE

Deux forces agissent sur l'outil (fig. 171) :

— la force $\mathbf{F}_c$ de même direction que le mouvement de coupe : c'est l'**effort de coupe** ;

— la force $\mathbf{F}$ perpendiculaire à $\mathbf{F}_c$ et à l'arête coupante. Cette force se décompose en $\mathbf{F}_a$ de même direction que le mouvement d'avance et en $\mathbf{F}_p$ de même direction que le mouvement profondeur de passe. $\mathbf{F}_a$ est l'**effort d'avancement**, $\mathbf{F}_p$ est l'**effort de pénétration.**

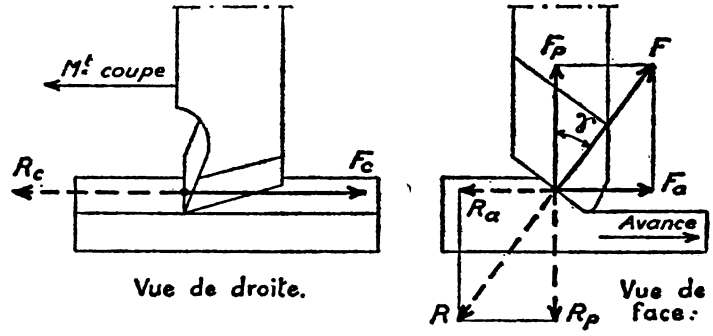


Fig 171 – *Action de la pièce sur l'outil et réaction de l'outil sur la pièce.*

L'outil réagit sur la pièce suivant les efforts de réaction $\mathbf{R}_c$ et $\mathbf{R}_a$ et $\mathbf{R}_p$.

Relations entre les efforts. L'angle γ est l'angle d'obliquité du profil de l'outil (fig. 171). Les valeurs de $\mathbf{F}_a$ et de $\mathbf{F}_p$, liées à la valeur de γ, sont données par les relations $\mathbf{F}_a = \mathbf{F} \times \sin \gamma$; $\mathbf{F}_p = \mathbf{F} \times \cos \gamma$

Comme on admet que l'effort $\mathbf{F}$ est sensiblement égal à $\mathbf{F}_c$ on a :

$$\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_c \times \sin \gamma \quad ; \quad \mathbf{F}_p = \mathbf{F}_c \times \cos \gamma$$

Pour $\gamma = 90^o$, $\sin \gamma = 1$ et $\cos \gamma = 0$ soit $\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_c$ et $\mathbf{F}_p = 0$.

Pour $\gamma = 45^o$, $\sin \gamma = \cos \gamma = \dfrac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}707$ d'où $\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_p = 0{,}7\ \mathbf{F}_c$.

Valeur approximative des efforts. L'effort de coupe $\mathbf{F}_c$ est le plus important et dépend de la ténacité du métal. En représentant par $(\mathbf{R}_r)_e$ la résistance à la rupture à l'extension du métal usiné, par $\mathbf{S}$ la section du copeau en mm^2 et par $\mathbf{k}$ un coefficient de majoration, on peut poser : $\mathbf{F}_c = \mathbf{k} \times (\mathbf{R}_r)_e \times \mathbf{S}$.

$\mathbf{k}$ est égal à 3 pour les aciers et varie de 4 à 5 pour les fontes.

Remarque. Le coefficient de coupe $\mathbf{k}$ augmente avec la diminution de section du copeau et diminue avec l'augmentation de la pente d'affûtage de l'outil.

B. PERÇAGE (fig. 172)

Les efforts de coupe appliqués au milieu de chaque arête coupante forment un couple dont le moment est $\mathbf{F}_c \times \dfrac{\mathbf{D}}{2}$

L'avance par tour étant $\mathbf{a}$, l'épaisseur du copeau enlevé par chaque arête est $\dfrac{\mathbf{a}}{2}$ et sa section $\mathbf{S}$ est

$$\mathbf{S} = \frac{\mathbf{a}}{2} \times \frac{\mathbf{D}}{2} = \frac{\mathbf{a}\,\mathbf{D}}{4}$$

Effort de coupe $\mathbf{F}_c = \mathbf{k} \times (\mathbf{R}_r)_e \times \mathbf{S}$.

Le moment du couple

$$\mathcal{M}_t = \mathbf{F}_c \times \frac{\mathbf{D}}{2} = \mathbf{k}\,(\mathbf{R}_r)_e \times \mathbf{S} \times \frac{\mathbf{D}}{2} =$$

$$\mathbf{k} \times (\mathbf{R}_r)_e \times \frac{\mathbf{a}\,\mathbf{D}^2}{8}\ mm/kg$$

Les deux efforts de pénétration $\mathbf{F}_p$ s'annulent parce qu'égaux et directement opposés.

Les deux efforts d'avancement $\mathbf{F}_a$ s'ajoutent parce que parallèles et leur résultante $\mathbf{R}$ est égale à leur somme.

On a : $\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_c \times \sin \dfrac{\alpha}{2}$ et $\mathbf{R} = 2\ \mathbf{F}_a = 2\ \mathbf{F}_c \times \sin \dfrac{\alpha}{2}$, α étant l'angle de pointe du foret.

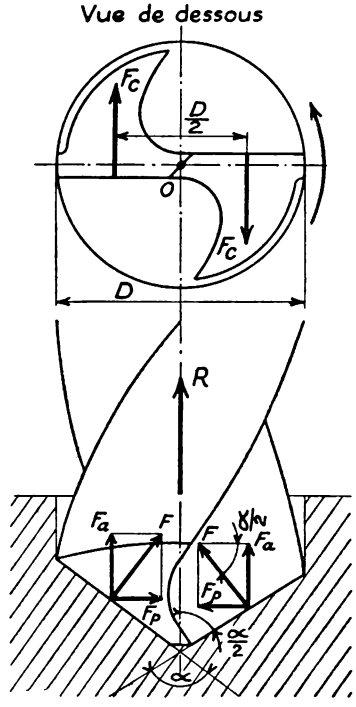


FIG 172 — *Action de la pièce sur le foret.*

C. FRAISAGE

Le fraisage s'effectue de deux manières :

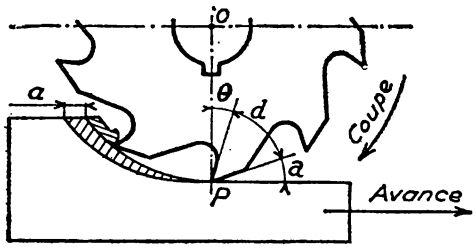


FIG 173 — *Mode d'action d'une fraise travaillant en sens contraire de l'avance ou en opposition.*

— en **opposition,** ou **en sens contraire,** lorsque le mouvement de coupe de l'outil est de sens contraire à celui de l'avance de la pièce (fig. 173);

— en **avalant,** ou **dans le même sens,** lorsque le mouvement de coupe de l'outil est de même sens que celui de l'avance de la pièce (fig. 176).

1° Travail en opposition ou en sens contraire. L'épaisseur du copeau (fig. 173), nulle au début de l'attaque — point **P** — est maximum au sortir de la dent.

Lorsque l'arête est au point **P**, il se produit un glissement de cette arête sur la pièce puisqu'à ce point l'épaisseur du copeau est nulle et elle ne coupera que lorsque l'épaisseur sera égale à celle du copeau minimum.

Ce glissement occasionne un écrouissage du métal. La dent qui trouve, après plusieurs autres, son copeau minimum, attaque donc une surface très écrouie, très dure, ce qui entraîne une usure prématurée de l'arête coupante. C'est ce qui explique le rendement peu élevé de la fraise travaillant en opposition par rapport à celui d'un outil à charioter. Le fraisage **en avalant** fait disparaître cette cause d'usure.

Action et réaction de l'outil et de la pièce.

a) La fraise est à taille droite (fig. 174). Dans le fraisage en opposition, les efforts à vaincre par l'outil sont :

— l'effort de coupe $\mathbf{F}_c$ normal au rayon aboutissant à l'arête coupante;

— l'effort $\mathbf{F}$ perpendiculaire à $\mathbf{F}_c$ et perpendiculaire à l'arête coupante. Cet effort se décompose en $\mathbf{F}_a$ qui est l'effort d'avancement et en $\mathbf{F}_p$ qui est l'effort de pénétration.

Tous ces efforts varient en grandeur avec la section du copeau qui, dans le fraisage, est constamment variable, et en direction du fait des mouvements relatifs fraise et pièce; il en résulte des vibrations continuelles.

L'outil réagit suivant $\mathbf{R}$ et $\mathbf{R}_c$ qui se décomposent en $\mathbf{R}_2$ et $\mathbf{R}_p$ dont la résultante

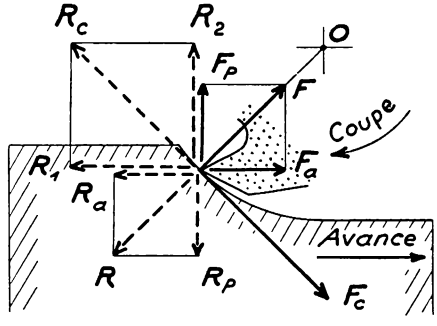


FIG 174 — *Action et réaction de l'outil et de la pièce dans le fraisage en opposition.*

tend à soulever la pièce et, partant, la table de la machine, et en $\mathbf{R}_1$ et $\mathbf{R}_a$ qui s'ajoutent et occasionnent une forte pression sur l'arête coupante et, par suite, son usure rapide.

L'effort de coupe $\mathbf{F}_c$ par dent de la fraise a pour valeur $\mathbf{F}_c = \mathbf{k} \times (\mathbf{R}_r)_e \times \mathbf{S}$ dans lequel **S** est le produit de l'épaisseur du copeau par la largeur de coupe.

b) La fraise est à taille hélicoïdale (fig. 175). Les dents sont inclinées sur l'axe de la fraise suivant un angle α.

L'effort de coupe $\mathbf{F}_c$ est normal à l'arête coupante et au rayon qui aboutit à cette arête. Il se décompose donc en **T** qui est **l'effort tangentiel** et en **P** qui est **l'effort de poussée axiale.**

Les efforts $\mathbf{F}_a$ et $\mathbf{F}_p$ conservent les mêmes directions que précédemment.

L'effort tangentiel $\mathbf{T} = \mathbf{F}_c \times \mathbf{cos}\ \alpha$, qui est l'effort d'entraînement de la fraise est plus faible pour une taille hélicoïdale que pour une taille droite. Cependant, il ne faut pas exagérer l'inclinaison α des dents afin de ne pas provoquer des poussées axiales trop importantes car $\mathbf{P} = \mathbf{F}_c \times \mathbf{sin}\ \alpha$.

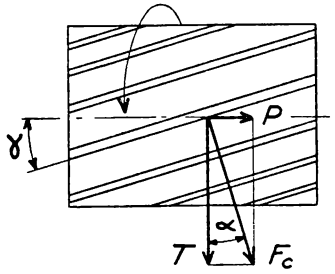


FIG 175 _ $T = F_c \times Cos \alpha$
$P = F_c \times Sin \alpha$

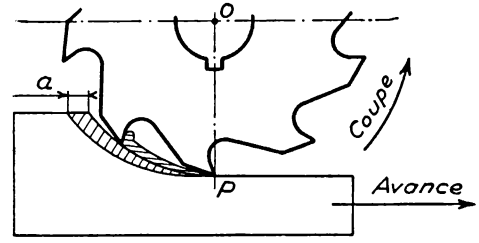


FIG 176 _ *Mode d'action d'une fraise travaillant en avalant.*

2° Fraisage en avalant (fig. 176).

Lorsque la dent attaque, le copeau a son épaisseur maximum de sorte que l'arête coupante ne glisse pas sur la partie usinée.

Lorsque la dent quitte le métal — point **P** — le copeau finit d'être enlevé presque sans pression sur le tranchant de l'outil. La surface obtenue est d'un bel aspect mat.

Action et réaction de l'outil et de la pièce.

a) La fraise est à taille droite (fig. 177). Les efforts qui s'opposent au travail de l'outil sont :

— l'effort de coupe $\mathbf{F}_c$ normal au rayon aboutissant à l'arête coupante;

— l'effort d'avancement $\mathbf{F}_a$ et l'effort de pénétration $\mathbf{F}_p$. Ces deux efforts sont de même sens que dans le fraisage en opposition, tandis que l'effort $\mathbf{F}_c$ est de sens contraire.

Les réactions de l'outil sont :

— $\mathbf{R}_2$ et $\mathbf{R}_p$ qui s'ajoutent et plaquent la pièce sur la table et, par conséquent, la table sur le chariot transversal;

— $\mathbf{R}_1$ et $\mathbf{R}_a$ dont la résultante agit dans le même sens que $\mathbf{F}_a$. La fraiseuse doit donc être munie d'un dispositif de freinage d'avance pour annuler les à-coups.

La valeur de l'effort de coupe par dent de la fraise est toujours $\mathbf{F}_c = \mathbf{k} \times (\mathbf{R}_r)_e \times \mathbf{S}$.

b) La fraise est à taille hélicoïdale. L'effort tangentiel **T** et la poussée **P** se calculent comme il l'a été dit dans le cas du fraisage en opposition.

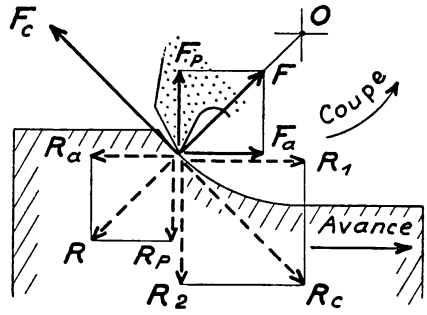


FIG 177 _ *Action et réaction de l'outil et de la pièce dans le fraisage en avalant.*

3° Problème application. Une fraise à taille hélicoïdale de diamètre 150 *mm* travaille sur une largeur de coupe de 80 *mm* une pièce en acier doux à 40 *kg/mm²* dans les conditions suivantes : avance par tour et par dent 0,2 *mm*, profondeur de passe 4 *mm*, vitesse de coupe 30 *m/mn*.

L'inclinaison de la denture étant 15° on demande :

1° la valeur de l'effort de coupe par dent;

2° la puissance nécessaire pour vaincre cet effort.

Solution

Section de coupe. La fraise étant peu engagée en profondeur dans la pièce, l'épaisseur **e** du copeau est plus petite que l'avance **a** (fig. 178).

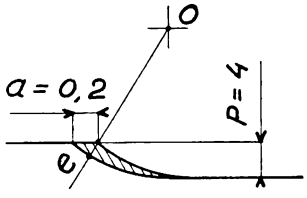


FIG 178 _ $e < a$.

Nous prendrons $\mathbf{e} = \frac{\mathbf{a}}{2} = 0{,}1$ *mm*

$$\mathbf{S} = 80 \times 0{,}1 = 8 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

Effort de coupe : Prenons $\mathbf{k} = 3$.

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{k} \times (\mathbf{R}_r)_e \times \mathbf{S} = 3 \times 40 \times 8 = 960 \text{ kg}$$

Effort tangentiel : $\mathbf{T} = \mathbf{F}_c \times \cos \alpha = \mathbf{F}_c \times \cos 15° = 960 \times 0{,}965 = 926$ *kg*.

Puissance nécessaire : C'est le travail en kilogrammètres par seconde divisé par 75 pour l'exprimer en chevaux-vapeur.

Soit ici. $\mathbf{P} = \dfrac{\mathbf{T} \times \text{chemin parcouru en mètres en 1 minute}}{60 \times 75} = \dfrac{\mathbf{T} \times \pi\ \mathbf{D}\ \mathbf{N}}{60 \times 75}$; mais

$\pi\ \mathbf{D}\ \mathbf{N} = \mathbf{V}$ *m/mn*

(1) Nous supposons que la largeur de coupe 80 *mm* est mesurée suivant l'arête hélicoïdale.

Finalement : $\mathbf{P} = \dfrac{\mathbf{T} \times \mathbf{V}}{60 \times 75} = \dfrac{926 \times 30}{60 \times 75} \simeq 6{,}2\ Ch$

Remarque. Cette puissance est la puissance disponible sur la broche porte-fraise ou **puissance utile** $\mathbf{P_u}$, évaluée à l'instant où l'effort sur la dent en travail est maximum.

La puissance du moteur $\mathbf{P_m}$ est plus élevée car il doit vaincre les résistances passives provenant des frottements des divers organes de transmission.

Le rendement ρ de la machine est le quotient des deux : $\rho = \dfrac{\mathbf{P_u}}{\mathbf{P_m}}$, de sorte que, en admettant $\rho = 0{,}80$, la puissance du moteur sera :

$$\mathbf{P_m} = \frac{6{,}2}{0{,}8} \simeq 8\ Ch \text{ au maximum.}$$

Résumé

Le travail de coupe est dû aux efforts provenant de l'action de la pièce sur l'outil.

Ces efforts sont :

- ***l'effort de coupe*** $\boldsymbol{F_c}$ **; c'est le plus important. Il a même direction que le mouvement de coupe ;**
- ***l'effort d'avancement*** $\boldsymbol{F_a}$ **de même direction que le mouvement d'avance ;**
- ***l'effort de pénétration*** $\boldsymbol{F_c}$ **de même direction que le mouvement profondeur de passe .**

La valeur de l'effort $\mathbf{F_c}$ **est donnée par la relation** $\mathbf{F_c = k \times (R_r)_e \times S}$ **dans laquelle**

$\mathbf{k = 3}$ **pour les aciers, 4 à 5 pour les fontes,**

$\mathbf{(R_r)_e}$ **= résistance à la rupture à l'extension en** kg/mm^2.

S = section du copeau en mm^2.

La section du copeau varie suivant le genre de travail.

En tournage : $\mathbf{S = a \times p}$**, valeur constante, et** $\mathbf{F_a = F_c \times \sin c}$ **;** $\mathbf{F_p = F_c \times \cos \gamma}$**,** γ **étant l'angle d'obliquité du profil de l'outil.**

En perçage : $\mathbf{S = \dfrac{a\,D}{4}}$**, valeur constante et** $\mathbf{F_a = F_c \times \sin \dfrac{\alpha}{2}}$**,** α **étant l'angle de pointe du foret.**

L'effort total d'avancement est $\mathbf{R = 2\ F_a}$.

En fraisage : **S = épaisseur du copeau × largeur de coupe.**

La section varie puisque l'épaisseur varie constamment.

L'effort de coupe est donc variable en grandeur et aussi en direction, ce qui provoque des vibrations continuelles.

Le *fraisage en avalant* laisse un plus bel aspect de surface, et donne une plus longue durée de l'outil, que le *fraisage en opposition.*

MODE D'ACTION DES OUTILS (Fin)

ÉTUDE DES ABLOCAGES

I. — GÉNÉRALITÉS

Toute pièce en cours d'usinage subit les réactions de l'outil. Il faut donc assujettir la pièce pour qu'elle équilibre ces efforts.

Ainsi la pièce en cours de rabotage (fig. 179) doit :

— être butée en bout pour équilibrer $\mathbf{R}_c$;

— être butée latéralement pour équilibrer $\mathbf{R}_a$;

— être appuyée sur la table porte-pièce pour équilibrer $\mathbf{R}_p$.

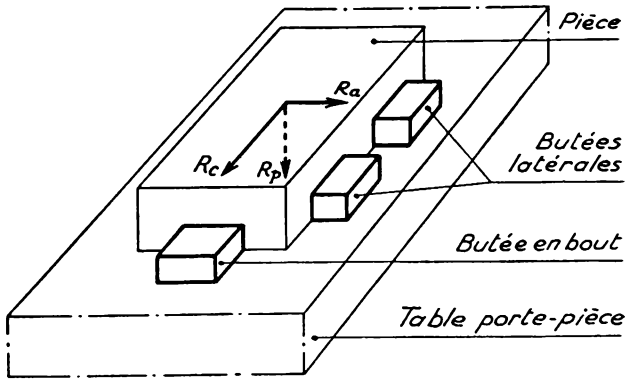


FIG 179 — *Equilibre des efforts supportés par une pièce en cours de rabotage.*

L'appui provoqué par le poids propre de la pièce est insuffisant pour éviter son déplacement sous les chocs et à-coups inévitables pendant le rabotage. Il est donc nécessaire d'augmenter la sécurité du montage par **immobilisation de la pièce par rapport à la table : c'est le but de l'ablocage.**

Mais l'usinage ayant pour but l'obtention de surfaces géométriquement correctes, la pièce ne doit pas, pendant ou après l'usinage, subir de déformations. Il faut donc, avant l'ablocage, assurer la précision de la position et la stabilité de la pièce.

II. — PRINCIPE DE L'ABLOCAGE

A. STABILITÉ DE LA PIÈCE

Si la face d'appui de la pièce est plane, l'appui peut être direct sur la table, considérée alors comme face de référence.

Si la face d'appui est brute, il faut poser la pièce sur des points d'appui (fig. 180). Ces points, au nombre d'au moins trois, doivent déterminer le polygone de sustentation recevant la projection du centre de gravité de la pièce. Ce sont des **points d'assise.**

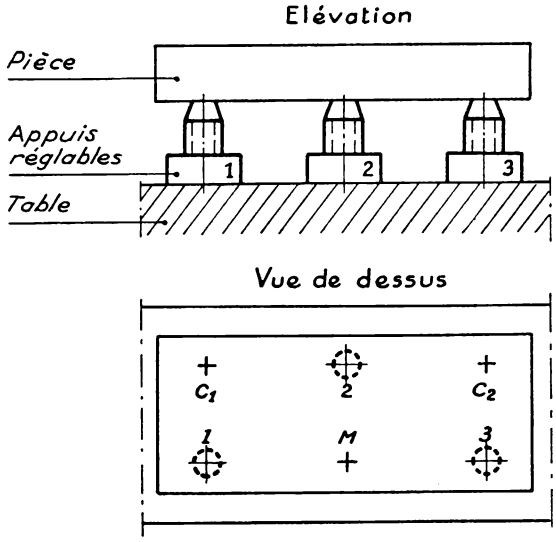


FIG 180 — *Points d'assise.*

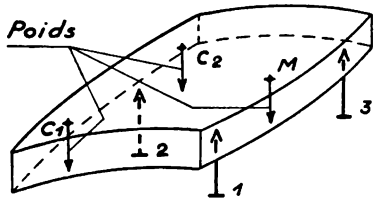


FIG 181 — *Les points d'assise sont insuffisants : la pièce se voile.*

Pour une pièce de grande surface (fig. 181) et afin d'éviter la flexion des coins C_1 et C_2 et de la partie **M** sous leur propre poids, il faut ajouter des points d'assise supplémentaires.

B. PRÉCISION DE LA POSITION DE LA PIÈCE

1° Dégauchissage vertical. Dans le cas d'une face d'appui déjà usinée, et si l'on veut obtenir une face qui lui soit parallèle, la précision est assurée par l'appui direct sur table. Parfois le rehaussement de la pièce est nécessaire pour en faciliter le montage ou l'usinage. A cet effet, les points d'appui sont remplacés par des règles, ou **cales,** rectifiées et de même épaisseur. Le dégauchissage est ainsi assuré.

Dans le cas d'une face brute, les points d'assise doivent servir au nivellement, au **dégauchissage.** On aura donc intérêt à les choisir réglables (fig. 180). Le dégauchissage s'opérera d'après des repères appartenant à la pièce : bossages, cimblots, dégagements..., etc.

2° Dégauchissage latéral. Les deux butées latérales et la butée en bout (fig. 179), en plus de leur rôle d'obstacle, servent aussi de points d'appui pour le dégauchissage latéral. Des butées réglables faciliteront donc cette opération.

C. IMMOBILISATION OU ABLOCAGE DE LA PIÈCE

L'ablocage peut être réalisé suivant deux principes ménageant obligatoirement la stabilité et le positionnement :

— ablocage par pressions verticales ;

— ablocage par pressions latérales.

Quel que soit le principe appliqué, les pressions sont provoquées par des systèmes (vis et écrou, came, levier...) agissant le plus souvent par l'intermédiaire de brides ou de mors.

1° Ablocage par pressions verticales. Le principe en est donné par la figure 182.

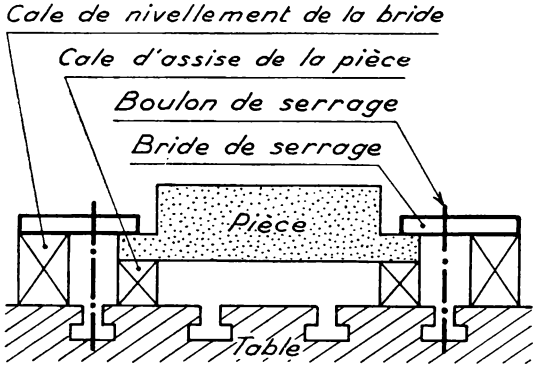


FIG 182 — *Principe de l'ablocage par pressions verticales à l'aide de brides et boulons.*

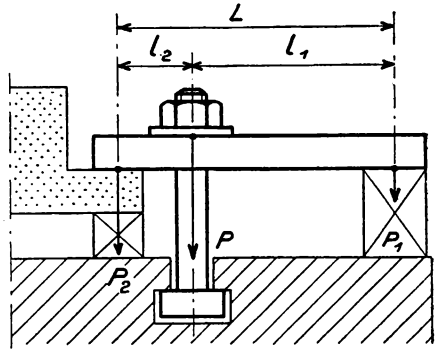


FIG 183 — *L'action de la bride sur la pièce doit être équilibrée par la cale d'assise.*

La figure 183 fait ressortir que la position relative des divers éléments n'est pas quelconque. En effet :

$$\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 = \mathbf{P} \quad ; \quad \mathbf{l}_1 + \mathbf{l}_2 = \mathbf{L} \quad ; \quad \mathbf{P}_2 \mathbf{L} = \mathbf{P} \mathbf{l}_1$$

De la dernière égalité on tire $\mathbf{P}_2 = \mathbf{P} \dfrac{\mathbf{l}_1}{\mathbf{L}}$

Par suite, plus $\mathbf{l}_1$ se rapprochera de $\mathbf{L}$, plus le rapport $\dfrac{\mathbf{l}_1}{\mathbf{L}}$ tendra vers 1 et plus $\mathbf{P}_2$ tendra vers $\mathbf{P}$.

Ce principe de base de l'utilisation rationnelle de la pression $\mathbf{P}$ dans l'ablocage par brides trouvera son application soit pour augmenter $\mathbf{P}_2$, soit pour diminuer $\mathbf{P}$ lui-même.

Mais $\mathbf{P}_2$ doit être directement équilibré pour éviter la déformation ou même la rupture de la pièce. **Il y a donc nécessité absolue de placer la cale ou le point d'assise dans la direction de $\mathbf{P}_2$.**

Remarques importantes. a) Il est possible d'assurer l'intensité de l'ablocage par multiplication des points de serrage tout en exerçant sur chaque point un effort $\mathbf{P}_2$ relativement faible. On opérera ainsi dans le cas d'ablocage de pièces fragiles ou facilement déformables ;

b) La forme de la bride doit localiser son appui et la flexion ne doit pas déplacer ce point d'appui. La figure 184 montre que la bride plane provoquera le basculement de la pièce et que la bride arrondie assurera sa stabilité.

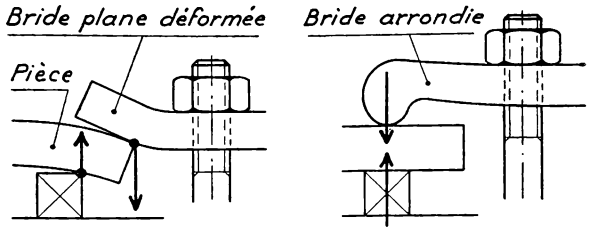


FIG 184 _ *Le fléchissement de la bride plane provoque le basculement de la pièce tandis que la bride arrondie assure sa stabilité.*

2° Ablocage par pressions latérales. Lorsque l'ablocage par dessus gêne le travail, on lui substitue l'ablocage par pressions latérales réalisé suivant le principe figure 185.

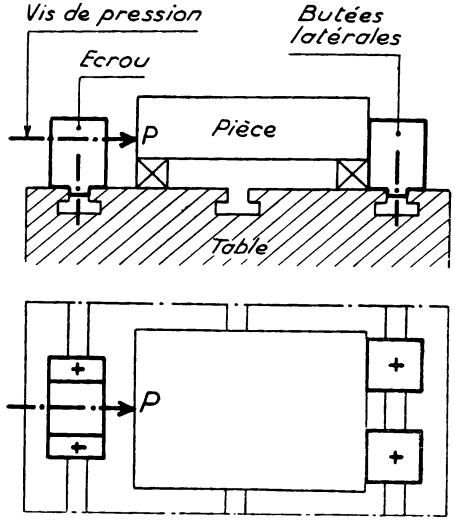


FIG 185 _ *Principe de l'ablocage par pressions latérales à l'aide de vis.*

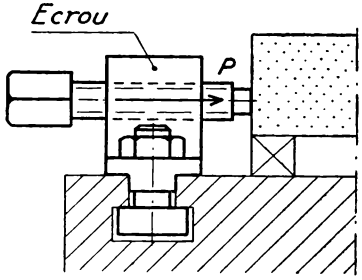


FIG 186 _ *Détail de la languette et de la fixation de l'écrou des butées latérales.*

La pression de serrage **P** pouvant faire glisser les butées latérales, ce qui détruirait la précision du positionnement, et reculer l'écrou, il faut munir ces organes de languettes s'engageant sans jeu dans les rainures de la table (fig. 186).

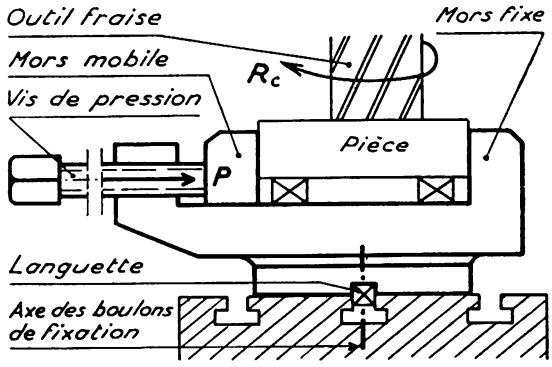


FIG 187 — *Ablocage en étau. Les languettes assurent le positionnement de l'étau et préviennent son glissement sous l'effort R_c de la fraise.*

Si l'effort s'exerce sur une pièce résistante, il peut être unique et s'appliquer entre les butées latérales. Au contraire, sur une pièce faible, il faut augmenter les points de pression tout en réduisant leur intensité et les disposer à l'opposé des butées latérales.

Sur une pièce brute, la pression de la vis peut être directe. Sur une pièce usinée, interposer une cale.

Il en est de même de l'ablocage en étau (fig. 187). Le mors fixe joue le rôle de butée latérale, le mors mobile celui de la cale intermédiaire. La pression **P** est donc répartie uniformément sur la longueur des mors ou de la pièce en contact avec eux.

Dans l'ablocage latéral, il peut y avoir *décollement* de la pièce d'avec les cales d'assise. Quelques coups de massette sur la pièce rétabliront le contact.

3° Ablocage par pressions latérales et verticales. C'est une combinaison des deux procédés précédents.

a) Ablocage par brides spéciales fig. 188). Les brides spéciales sont réservées à l'usinage en série. Leur emploi exige un porte-pièce étudié en fonction de la pièce à usiner fixé lui-même sur la table de la machine ou plus généralement sur la base du montage d'usinage.

La bride est sollicitée par la force **F** due à l'action du boulon et par les réactions $\mathbf{R}_1$ du porte-pièce et $\mathbf{R}_2$ de la pièce. Ces trois forces sont en équilibre et concourent en **A**. La pièce est donc plaquée sur son appui par la force **P** égale et opposée à $\mathbf{R}_2$.

b) Ablocage par clames. Ce genre d'ablocage s'emploie sur des pièces trop longues ou trop larges pour être montées en étau.

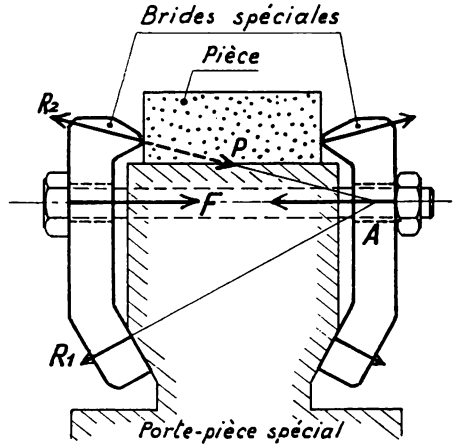


FIG 188. *Ablocage par pressions latérales et verticales.*

La figure 189 en montre le principe. La clame est sollicitée par les forces $\mathbf{F}_1$ et $\mathbf{F}_2$ appliquées par le mors poussée par la vis **V**, et par les réactions $\mathbf{R}_1$ de la pièce et $\mathbf{R}_2$ de la table. Ces quatre forces sont en équilibre et leurs résultantes **F** et **R** sont égales et opposées. Le décollement de la pièce, vers le haut, est empêché par l'adhérence de la clame en **A** et sa butée rigide en **B**.

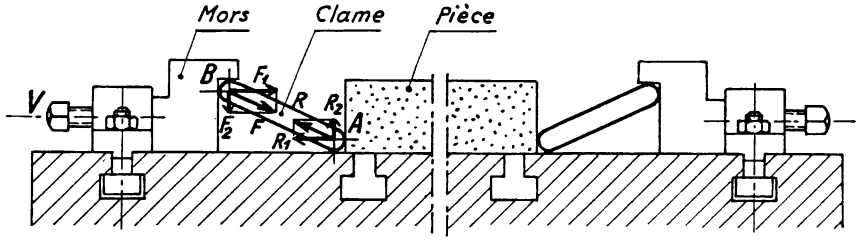


FIG 189 - *Ablocage par clames.*

Remarque. Dans la majorité des cas de montage sur la table ou en étau, les forces d'adhérence provoquées par les efforts verticaux ou latéraux sont suffisantes pour empêcher tout glissement de la pièce sous l'effort de coupe. Ceci explique la suppression de la butée en bout dans ces montages.

Par contre, pour l'usinage en **montages d'usinage** la butée en bout est toujours assurée car elle concourt à la précision du positionnement de la pièce dans le montage.

Résumé

Les réactions de l'outil sur la pièce nécessitent son immobilisation. Il faut donc :

- **équilibrer la réaction de coupe par une butée en bout,**
- **équilibrer la réaction d'avancement par des butées latérales,**
- **équilibrer la réaction de pénétration par appui de la pièce sur la table ou sur des butées d'assise,**
- **immobiliser par ablocage.**

La *stabilité* de la pièce est assurée par les butées d'assise, la *précision de sa position* par les butées latérales et la butée en bout, l'*ablocage* par des accessoires provoquant des pressions d'appui.

Les pressions d'appui doivent agir à l'opposé des butées d'assise ou des butées latérales afin d'éviter les déformations ou la rupture de la pièce. Ces pressions peuvent être :

- **soit verticales,**
- **soit latérales,**
- **soit simultanément verticales et latérales.**

La grandeur des pressions d'appui dépend des positions relatives de la pièce et des accessoires d'ablocage. Il y a toujours intérêt à obtenir la plus grande pression d'appui pour un même effort d'ablocage.

La butée en bout n'est pas absolument nécessaire dans le montage direct sur table ou en étau, les pressions d'appui étant le plus souvent suffisantes pour assurer l'immobilisation de la pièce.

VITESSE DE COUPE

I. — GÉNÉRALITÉS (1)

DÉFINITION GÉNÉRALE DE LA VITESSE DE COUPE

On appelle vitesse de coupe la plus grande valeur des vitesses relatives en mètres par minute de tous les points de la surface de la pièce en contact avec l'outil.

La vitesse moyenne d'un mobile est le quotient de l'espace parcouru **e** par le temps **t** mis pour le parcourir. Si **e** est exprimé en mètres et **t** en minutes,

$$\mathbf{V}\ m/mn = \frac{\mathbf{e}\ m}{\mathbf{t}\ mn}$$

Cette relation est appliquée pour le calcul de la vitesse de coupe d'un outil, **t** étant égal à 1 *mn*.

Pour le mouvement circulaire uniforme

$$\mathbf{V}\ m/mn = \frac{\pi\ \mathbf{D}\ \mathbf{N}}{1\,000} \text{ dans laquelle}$$

D = diamètre de l'outil ou de la pièce en millimètres,

N = nombre de tours de l'outil ou de la pièce en une minute.

Pour le mouvement rectiligne alternatif, la relation $\mathbf{V}\ m/mn = \frac{2\,\mathbf{C}\,\mathbf{N}}{1\,000}$ avec **C** = course en millimètres et **N** nombre de battements à la minute, donne une vitesse moyenne acceptable en pratique courante, assez éloignée de la vitesse de coupe réelle.

En effet, la longueur parcourue $\frac{2\,\mathbf{C}\,\mathbf{N}}{1\,000}$ comprend une moitié en courses *aller* (travail) et une moitié en courses *retour*. La moitié $\frac{\mathbf{C}\,\mathbf{N}}{1\,000}$ correspondant aux courses *aller* est parcourue en un temps **t** et l'autre moitié en un temps **t'** toujours plus faible (retour rapide).

En supposant que $\mathbf{t} + \mathbf{t}' = 1\ mn$, la longueur *aller* est parcourue en $1\ mn \times \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t} + \mathbf{t}'}$.

(1) Ces généralités ont été données sommairement en classe de 4e, vingt-deuxième leçon.

La vitesse en 1 *mn* est alors

$$\mathbf{V} = \frac{\left(\frac{\mathbf{C\,N}}{1\,000}\right)}{\left(\frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t}+\mathbf{t}'}\right)} = \frac{\mathbf{C\,N}}{1\,000} \times \frac{\mathbf{t}+\mathbf{t}'}{\mathbf{t}} = \frac{\mathbf{C\,N}}{1\,000} \times \left(\frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t}} + \frac{\mathbf{t}'}{\mathbf{t}}\right)$$

En appelant **r** le rapport du temps de retour **t'** au temps de travail **t**, soit $\mathbf{r} = \frac{\mathbf{t}'}{\mathbf{t}}$

on a finalement $$\mathbf{V}\ m/mn = \frac{\mathbf{C\,N}\ (1+\mathbf{r})}{1\,000}$$

Remarques. 1° Le rapport **r** est variable dans l'étau-limeur à bielle à balancier et d'autant plus petit que la course est grande. Pour les petites courses $\mathbf{t} \simeq \mathbf{t}'$ et $\mathbf{r} \simeq 1$

d'où $$\mathbf{V}\ m/mn = \frac{\mathbf{C\,N}\ (1+1)}{1\,000} = \frac{2\ \mathbf{C\,N}}{1\,000}$$

2° Pour l'étau-limeur à crémaillère et la raboteuse, le rapport **r** est constant et égal au rapport de l'équipage des poulies et des roues dentées de la machine.

II. — DÉBIT D'UN OUTIL, VITESSE DE MOINDRE USURE ET VITESSE ÉCONOMIQUE

A. DÉBIT D'UN OUTIL

Le débit d'un outil est le volume de copeaux exprimé en décimètres cubes que cet outil peut produire entre deux affûtages successifs.

L'outil ne coupe plus quand son arête coupante produit un copeau arraché et une surface rugueuse.

B. VITESSE DE MOINDRE USURE

Le commandant DENIS, par ses travaux d'expérimentation méthodique remarquables, a montré que le débit d'un outil (fig. 190), d'abord faible pour les petites vitesses de coupe, croît ensuite en même temps que les vitesses de coupe jusqu'à un **débit maximum $\mathbf{D}_o$** atteint pour une vitesse de coupe $\mathbf{V}_o$ dite **vitesse de moindre usure.**

Pour les vitesses supérieures à $\mathbf{V}_o$, le débit décroît assez vite et devient **nul** pour une vitesse $\mathbf{V}_l$ appelée **vitesse limite** qui donne l'usure instantanée de l'outil.

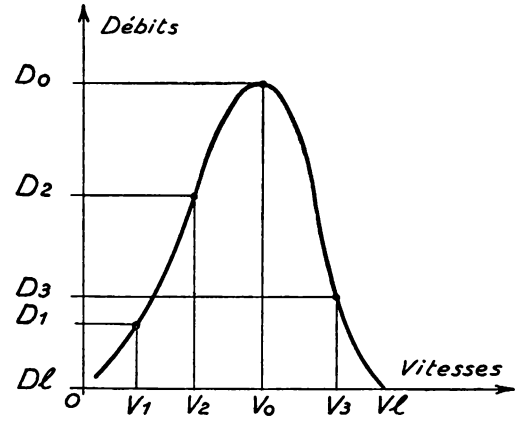


FIG 190 — *Courbe de débit.*
$D_1 < D_2$ pour $V_1 < V_2$
$D_2 < D_o$ pour $V_2 < V_o$
$D_o > D_3$ pour $V_o < V_3$
$D\ell = 0$ pour $V\ell > V_3$

Ces deux vitesses sont liées par la relation

$$\mathbf{V}^1 = \mathbf{V}_o + \frac{2}{3}\mathbf{V}_o = \frac{5}{3}\mathbf{V}_o \qquad \text{d'où} \qquad \mathbf{V}_o = \frac{3}{5}\mathbf{V}$$

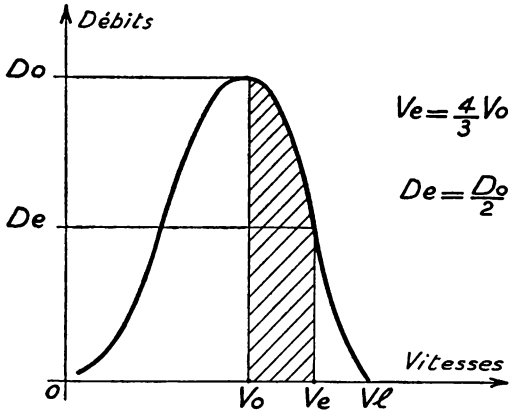


FIG 191 — *Zone des vitesses économiques.*

C. VITESSE ÉCONOMIQUE

Le commandant DENIS a également montré qu'il existe entre $\mathbf{V}_o$ et $\mathbf{V}_1$ une vitesse $\mathbf{V}_e$ qui donne un débit $\mathbf{D}_e = \frac{\mathbf{D}_o}{2}$. Cette vitesse, qui a pour valeur $\mathbf{V}_e = \mathbf{V}_o + \frac{1}{3}\mathbf{V}_o = \frac{4}{3}\mathbf{V}_o$ est appelée **vitesse économique** (fig. 191). Elle donne une usure plus rapide de l'outil et il faut donc affûter plus souvent, mais elle permet d'obtenir une production horaire plus grande que celle obtenue avec $\mathbf{V}_o$.

D. ZONES DES VITESSES ÉCONOMIQUES

Pour quelques vitesses comprises entre $\mathbf{V}_o$ et $\mathbf{V}_e$, le commandant DENIS a établi les débits correspondants (Tableau n° 6).

Vitesses	*Débits*	*Vitesses*	*Débits*
V_o	D_o (maxi)	$V_o + \frac{11}{40} V_o$	$0,7\ D_o$
$V_o + \frac{1}{5} V_o$	$0,9\ D_o$	$V_o + \frac{3}{10} V_o$	$0,6\ D_o$
$V_o + \frac{1}{4} V_o$	$0,8\ D_o$	$V_o + \frac{1}{3} V_o = V_e$	$0,5 D_o = D_e$

Tableau N°6 – *Valeurs des différentes vitesses comprises entre V_o et V_e et des débits correspondants.*

Elles sont comprises dans une zone dite **zone des vitesses économiques,** hachurée sur la figure 191. Elles procurent toutes une production plus élevée que $\mathbf{V}_o$ et ceci d'autant plus que l'on se rapproche de $\mathbf{V}_e$.

E. EXEMPLE COMPARATIF DE PRODUCTIONS OBTENUES PAR $\mathbf{V}_o$ ET $\mathbf{V}_e$ TIRÉ DES TRAVAUX DU Commandant DENIS

Données. Matière travaillée : acier à 90 *kg/mm²*, passe 5 *mm*, avance 0,5 *mm*,

$\mathbf{V}_o = 11$ *m/mn*, $\mathbf{D}_o = 6$ dm^3. Travail à sec au tour, temps de travail 50 *h*, outil en **A. R. E. S.**

1° Production avec $\mathbf{V}_o$.

Section du copeau : $5 \times 0{,}5 = 2{,}5$ $mm^2 = 0{,}00025$ dm^2.

Volume détaché en 1 *mn* : $0{,}00025 \times 110 = 0{,}0275$ dm^3.

Durée de l'outil : $6 : 0{,}0275 = 218$ *mn* $= 3$ *h* 38 *mn*.

Volume détaché en 50 *h* : $\dfrac{50}{3{,}38} \times 6 = 82{,}5$ dm^3.

2° Production avec $\mathbf{V}_e$.

$$\mathbf{V}_e = \frac{4}{3}\,\mathbf{V}_o = \frac{4}{3} \times 11 = 14{,}6 \text{ } m/mn.$$

$$\mathbf{D}_e = \frac{\mathbf{D}_o}{2} = \frac{6}{2} = 3 \text{ } dm^3.$$

Volume détachée en 1 *mn* : $0{,}00025 \times 146 = 0{,}0365$ dm^3.

Durée de l'outil : $3 : 0{,}0365 = 83$ *mn* $= 1$ *h* 23 *mn*.

Volume détaché en 50 *h* : $\dfrac{50}{1{,}23} \times 3 = 108$ dm^3.

La vitesse $\mathbf{V}_e$, qui a permis de produire 25,5 dm^3 de copeaux en plus que la vitesse $\mathbf{V}_o$, dans le même temps, donne un prix de revient plus bas que la vitesse $\mathbf{V}_o$. C'est donc bien la vitesse économique.

Remarque. Il faut cependant tenir compte du temps de réaffûtage et de remise en place de l'outil qui est sensiblement double dans le deuxième cas. Le calcul ainsi établi donne encore largement l'avantage à la vitesse économique.

III. — CHOIX DE LA VITESSE DE COUPE

Les considérations suivantes permettent de décider du choix entre la vitesse de moindre usure et la vitesse économique.

A. ADOPTION DE LA VITESSE DE MOINDRE USURE

Cette vitesse, qui donne le plus grand débit, est à adopter :

— **pour les outils difficiles à confectionner :** outils de tour de forme, fraise de forme, lame de forme. On obtient ainsi le maximum de pièces semblables avant usure complète et on économisera le prix de confection de nouveaux outils ;

— **pour les outils difficiles et longs à affûter** (fraises) **ou à mettre en place et à régler** (outils à tailler). On évitera ainsi les longues pertes de temps puisque l'on affûtera moins souvent.

B. ADOPTION DE LA VITESSE ÉCONOMIQUE

Si les outils sont faciles à confectionner et à affûter, rapides à monter et à régler (outils usuels de tournage, de rabotage, forets hélicoïdaux) on adopte la vitesse économique. La plus grande production est ainsi obtenue permettant de répartir le prix de l'outil sur un plus grand nombre de pièces et, quoique son usure soit rapide, en assure l'amortissement dans les meilleures conditions de prix de revient.

C. RESPECT DE LA VITESSE DE COUPE ADOPTÉE

La vitesse de coupe étant choisie en fonction des conditions précédentes, il reste à l'ouvrier à donner à sa machine la **vitesse de marche** qui corresponde à cette vitesse de coupe.

Des relations fondamentales :

$$\mathbf{V}\ m/mn = \frac{\pi\ \mathbf{D}\ \mathbf{N}}{1\,000} \qquad \text{et} \qquad \mathbf{V}\ m/mn = \frac{\mathbf{C}\ \mathbf{N}\ (1 + \mathbf{r})}{1\,000}$$

$$\text{on tire } \mathbf{N}\ t/mn = \frac{1\,000\ \mathbf{V}}{\pi\ \mathbf{D}} \text{ et } \mathbf{N}\ b/mn = \frac{1\,000\ \mathbf{V}}{\mathbf{C}\ (1 + \mathbf{r})}$$

Mais il ne faut pas oublier que la vitesse de coupe ne sera exactement celle choisie que si le nombre de battements-minute ou de tours-minute théorique correspond à un des paliers qui s'étalent dans la gamme de la machine.

Dans le cas contraire (cas le plus fréquent), il faut choisir le palier le plus rapproché par défaut.

Problème exemple : Vitesse de coupe choisie : $\mathbf{V}_o = 26\ m/mn$; diamètre de la lame de forme 55 *mm*; différents paliers de la machine à percer 50 - 80 - 125 - 200 - 320 - 500 *tr/mn*. Quelle vitesse de rotation faut-il adopter ?

Solution

Vitesse de rotation théorique : $\mathbf{N} = \frac{1\,000 \times 26}{3{,}14 \times 55} = 150\ t/mn$, nombre compris entre 125 et 200 *t/mn*.

Vitesse de coupe à 125 *t/mn* : $\mathbf{V} = \frac{3{,}14 \times 55 \times 125}{1\,000} = 21\ m/mn$

Vitesse de coupe à 200 *t/mn* : $\mathbf{V} = \frac{3{,}14 \times 55 \times 200}{1\,000} = 34\ m/mn$

En tournant à 200 *t/mn*, soit à une vitesse de coupe de 34 *m/mn*, plus élevée que celle choisie, l'usure de l'outil sera trop rapide et la diminution de production sera certaine en raison du temps considérable passé à l'affûtage.

En tournant à 125 *t/mn*, soit à une vitesse de coupe de 21 *m/mn*, plus faible que celle choisie, la production sera aussi plus faible, mais l'outil aura une plus longue tenue de coupe, d'où réduction des temps perdus pour l'affûtage. C'est donc cette vitesse qui sera adoptée.

Remarques. 1° Au-dessous de $\mathbf{V}_o$ le débit diminue presque aussi vite qu'au-dessus de $\mathbf{V}_o$. Logiquement il faut donc choisir la vitesse immédiatement inférieure mais modifier les conditions de coupe (voir vingt-neuvième leçon).

2° Si la vitesse de rotation réelle immédiatement supérieure à la vitesse de rotation théorique en est peu différente, il est logique de l'utiliser.

3° L'exemple traité montre que, pour une même gamme de vitesses de rotation, les paliers doivent être très rapprochés afin d'utiliser une vitesse pratique peu différente de la vitesse théorique. D'où la nécessité de boîtes de vitesses à un grand nombre de rapports ou à variation continue.

Résumé

VITESSE DE COUPE. La vitesse de coupe est la plus grande valeur des vitesses relatives en mètres par minute de tous les points de la surface de la pièce en contact avec l'outil.

Elle est donnée par les relations :

$$\mathbf{V}\ m/mn = \frac{\pi\ \mathbf{D}\ \mathbf{N}}{1\,000}$$ **pour le mouvement circulaire uniforme,**

$$\mathbf{V}\ m/mn = \frac{\mathbf{C}\ \mathbf{N}\ (1 + \mathbf{r})}{1\,000}$$ **pour le mouvement rectiligne alternatif,**

r étant le rapport du temps de retour au temps de travail.

DÉBIT D'UN OUTIL. Le débit d'un outil est le volume de copeaux exprimé en décimètres cubes que cet outil peut produire entre deux affûtages successifs.

Le débit maximum $\mathbf{D}_o$ est atteint pour une vitesse $\mathbf{V}_o$ appelée *vitesse de moindre usure*.

Pour les vitesses supérieures à $\mathbf{V}_o$ le débit décroît et devient nul pour une vitesse $\mathbf{V}_1$ dite *vitesse limite* qui provoque une usure instantanée de l'outil.

Entre $\mathbf{V}_o$ et $\mathbf{V}_1$ il existe une vitesse $\mathbf{V}_e$ appelée *vitesse économique* dont le débit $\mathbf{D}_e$ est sensiblement égal à $\frac{\mathbf{D}_o}{2}$.

Les vitesses $\mathbf{V}_e$ et $\mathbf{V}_1$ sont liées à la vitesse $\mathbf{V}_o$ par les relations suivantes :

$$\mathbf{V}_1 = \frac{5}{3}\mathbf{V}_o \quad ; \quad \mathbf{V}_e = \frac{4}{3}\mathbf{V}_o$$

La vitesse économique exige des affûtages plus fréquents mais elle assure une production supérieure à celle que donnerait la vitesse de moindre usure.

CHOIX DE LA VITESSE DE COUPE. La vitesse de moindre usure est à employer lorsque l'outil est difficile à confectionner, à affûter, ou lorsque son réglage est long et malaisé.

La vitesse économique est à adopter quand l'outil est facile à construire, à affûter, à monter, c'est-à-dire pour les travaux de chariotage et de perçage en général.

La vitesse de coupe étant choisie, il faut donner à la machine une vitesse de marche qui assure le respect de cette vitesse de coupe.

Le nombre théorique de tours-minute ou de battements-minute est donné par les relations

$$\mathbf{N}\ tr/mn = \frac{1\,000\ \mathbf{V}}{\pi\ \mathbf{D}} \quad ; \quad \mathbf{N}\ b/mn = \frac{1\,000\ \mathbf{V}}{\mathbf{C}\ \mathbf{N}\ (1 + \mathbf{r})}$$

Dans le cas où le nombre théorique N n'est pas permis par la machine, prendre le nombre immédiatement inférieur afin d'éviter une usure trop rapide de l'outil.

VITESSE DE COUPE (Suite)

FACTEURS DONT DÉPEND LA VITESSE DE COUPE

De nombreux essais sur la coupe des métaux ont été réalisés. Le commandant DENIS a basé les siens sur les conditions types de coupe suivantes.

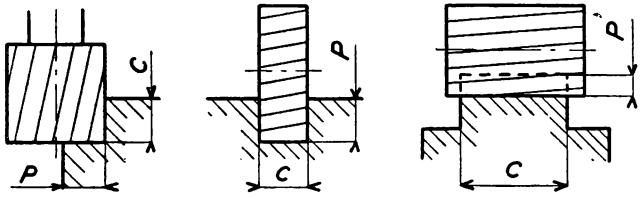


FIG 192 — *Essais de Fraisage.*
p : largeur de passe c : largeur de coupe.

Chariotage. Travail à sec, profondeur de passe : 5 *mm*, avance : 0,5 *mm*.

Perçage. Travail avec lubrification sous pression, diamètre du foret 25 *mm*, avance par tour 0,25 *mm*.

Fraisage. Travail avec arrosage peu abondant, somme des largeurs de coupe et de passe : 50 *mm* (fig. 192), avance par tour et par dent : 0,05 *mm*.

Les différents essais ont montré que la vitesse de coupe varie d'après les facteurs ci-dessous.

I. — MODE DE TRAVAIL.

Les essais de chariotage au tour, de perçage au foret hélicoïdal, de fraisage, ont révélé que la vitesse de moindre usure varie d'après le mode de travail (fig. 193), cependant que les courbes de débit sont de formes semblables.

Les courbes de la figure 193 se rapportent au chariotage, au fraisage, au perçage d'un acier à 60 *kg/mm²* avec outil en A. R. S. dans les conditions types de coupe.

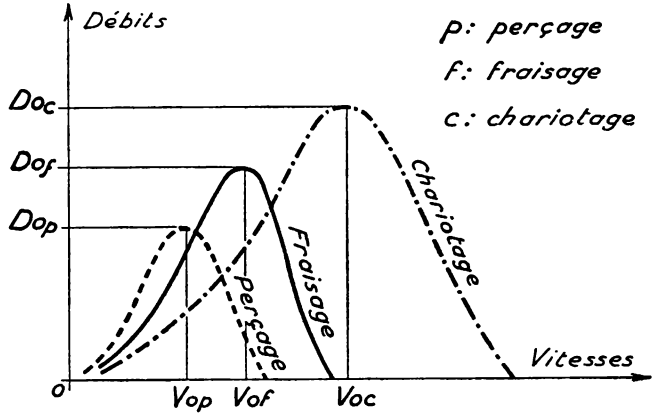


FIG 193 — *Variation de Vo et de Do d'après le mode d'usinage.*

Perçage	: $\mathbf{V}_{op} = 11\ m/mn$	;	$\mathbf{D}_{op} = 9\ dm^3$
Fraisage	: $\mathbf{V}_{of} = 14\ m/mn$	;	$\mathbf{D}_{of} = 12\ dm^3$
Chariotage	: $\mathbf{V}_{oc} = 22\ m/mn$	;	$\mathbf{D}_{oc} = 15\ dm^3$

Remarque. Pour le rabotage, la vitesse adoptée est les $\frac{2}{3}$ de la vitesse de chariotage au tour. Cette réduction est imposée, quand on utilise les outils en acier rapide, par leur manque de résistance aux chocs.

II. — NATURE DU MATÉRIAU A OUTIL

Pour un même métal, usiné dans les mêmes conditions de travail, la vitesse de moindre usure et le débit correspondant augmentent lorsque les qualités du matériau à outil s'améliorent (fig. 194).

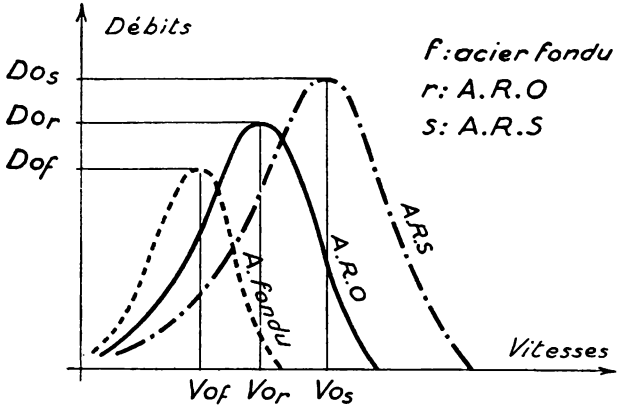


FIG 194 — *Variation de Do et de Vo d'après le matériau à outil.*

Ainsi, les aciers rapides, plus durs que les aciers au carbone, se trempent et conservent leur dureté à des températures plus élevées que ces derniers. Ils permettent donc de travailler plus vite car ils supportent mieux la chaleur dégagée par le travail.

Pour les mêmes raisons, les carbures métalliques autorisent l'emploi de vitesses de coupe plus grandes que les aciers rapides.

Les courbes de la figure 194 sont les courbes de débit obtenues par chariotage à sec d'un acier à 60 kg/mm^2 avec les outils suivants dans les conditions types de coupe.

Outil en acier fondu	: $\mathbf{V}_{of} = 7\ m/mn$	;	$\mathbf{D}_{of} = 12\ dm^3$.
Outil en acier rapide ordinaire	: $\mathbf{V}_{or} = 18\ m/mn$	;	$\mathbf{D}_{or} = 14\ dm^3$.
Outil en acier rapide supérieur	: $\mathbf{V}_{os} = 22\ m/mn$	;	$\mathbf{D}_{os} = 15{,}5\ dm^3$.

Ceci met en évidence l'infériorité des aciers à outil au carbone par rapport aux aciers rapides et la cause de leur délaissement par l'industrie.

III. — TÉNACITÉ OU DURETÉ DU MÉTAL TRAVAILLÉ

Pour un même outil travaillant dans les mêmes conditions de coupe, la vitesse de

moindre usure et le débit correspondant diminuent lorsque la ténacité ou la dureté du métal augmentent (fig. 195).

Plus le métal travaillé est dur ou tenace, plus l'effort de coupe est grand et plus la chaleur dégagée par le détachement du copeau est élevée. Il faut donc travailler moins vite pour laisser à cette chaleur le temps de se dissiper dans le corps de l'outil.

Les courbes de la figure 195 se rapportent au chariotage, à l'aide d'un outil en A. R. S., des métaux suivants :

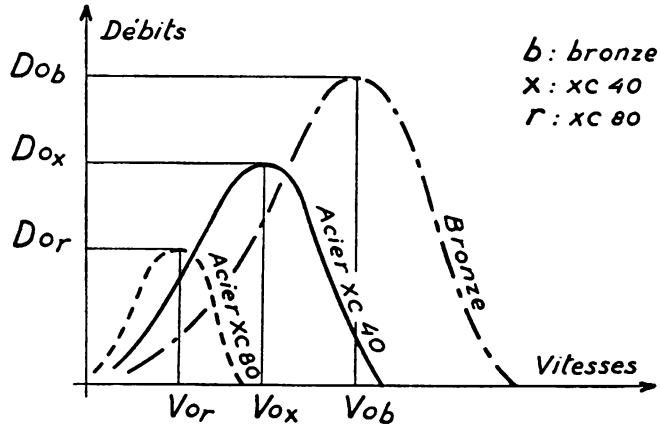


FIG 195 — *Variation de Vo et de Do d'après la nature du métal travaillé.*

Bronze à 90/10 : $\mathbf{V}_{ob} = 54$ *m/mn* ; $\mathbf{D}_{ob} = 38$ dm³.
Acier à 40 *kg/mm²* : $\mathbf{V}_{ox} = 31$ *m/mn* ; $\mathbf{D}_{ox} = 23$ dm³.
Acier à 80 *kg/mm²* : $\mathbf{V}_{or} = 14$ *m/mn* ; $\mathbf{D}_{or} = 9$ dm³.

IV. — REFROIDISSEMENT DE L'OUTIL ET DE LA PIÈCE

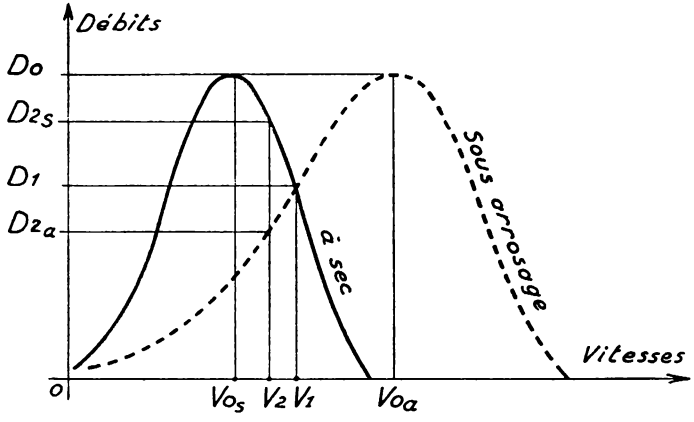


FIG 196 — *La vitesse de moindre usure sous arrosage V_{oa} est plus grande que la vitesse de moindre usure à sec V_{os}, mais les débits Do sont les mêmes.*

La chaleur dégagée par le détachement du copeau étant la grande cause de l'usure de l'outil, les essais ont montré qu'en absorbant cette chaleur par arrosage de l'outil et de la pièce,

— la vitesse de moindre usure augmente,

— le débit reste inchangé (fig. 196).

Ayant le même débit dans un temps plus court il y a donc intérêt à travailler sous arrosage.

Remarque importante. Soit V_1 la vitesse correspondant à l'intersection des deux courbes : le débit D_1 est le même avec arrosage ou à sec.

Si nous choisissons une vitesse $V_2 < V_1$, le débit à sec D_{2s} est supérieur au débit sous arrosage D_{2a}. Il faut donc se garder de choisir une vitesse de coupe trop faible lorsqu'on travaille sous lubrification.

Après de nombreux essais on a pu établir les relations suivantes.

Chariotage (tournage, rabotage) **et perçage.** Si V_{os} est la vitesse de moindre usure à sec et V_{oa} la vitesse de moindre usure sous lubrification abondante, on a :

$$V_{oa} = 1{,}5\, V_{os}$$

Fraisage. Si V_{os} est la vitesse de moindre usure avec faible arrosage et V_{oa} la vitesse de moindre usure sous lubrification abondante, on a

$$V_{oa} = 1{,}25\, V_{os}$$

V. — SECTION DU COPEAU

Pour un même métal, usiné avec un même outil, dans les mêmes conditions de refroidissement (à sec ou sous lubrification) la vitesse de moindre usure augmente avec la diminution de la section du copeau.

Cependant, pour une même section, on a intérêt à prendre une passe plus profonde et une avance plus faible parce que le copeau s'enroule mieux.

A la suite de nombreux essais on a pu établir la loi importante suivante.

LOI DU DÉBIT CONSTANT

Lorsqu'on fait varier la section du copeau, les autres conditions de coupe ne changeant pas,

1° **le débit reste constant,**

2° **les différentes vitesses de moindre usure** V_o, V_1, V_2..., **les avances** a_o, a_1, a_2..., **les profondeurs de passe** p_o, p_1, p_2... sont liées par la relation $a_o^2\, p_o\, V_o^3 = a_1^2\, p_1\, V_1^3 = a_2^2\, p_2\, V_2^3 =$ **constante.**

V_o étant connue pour les conditions types a_o et p_o, on peut écrire :

$$V_1^3 = \frac{a_o^2\, p_o\, V_o^3}{a_1^2\, p_1} \text{ et } V_1 = V_o \sqrt[3]{\frac{a_o^2\, p_o}{a_1^2\, p_1}}$$

a_1 et p_1 étant les nouvelles conditions fixées pour le travail et par la machine.

VI. EXTRAITS DES TRAVAUX DU COMMANDANT DENIS

Nous donnons ci-après des tableaux des vitesses de coupe de moindre usure et des débits correspondants pour le chariotage, le fraisage et le perçage de quelques métaux usuels à l'aide d'outils en acier fondu et en acier rapide.

Métal travaillé	Outil en acier fondu		Outil en A.R.O		Outil en A.R.S	
	V_o	D_o	V_o	D_o	V_o	D_o
Laiton	22	32	52	38	62	40
Bronze 90 % Cu, 10 % Sn	19	28	45	34	54	38
Fonte grise	13	10,5	30	12,5	36	13,5
Acier (Rr) e = 40 kg/mm²	11	18	26	21	31	23
——— 60 ———	7	12	18	14	22	15,5
——— 80 ———	4,5	7	12	8	14	9
——— 100 ———	2	2,4	6	2,7	8	3
——— 110 ———	1	0,21	4	0,65	5	0,75

Tableau N° 7 _ Vitesses de moindre usure et débits correspondants pour chariotage à sec dans les conditions types $a = 0,5$ mm et $p = 5$ mm.

Métal travaillé	Outil en acier fondu		Outil en A.R.O		Outil en A.R.S	
	V_o	D_o	V_o	D_o	V_o	D_o
Laiton	20	25	24	28	30	36
Bronze 90 % Cu, 10 % Sn	19	22	22	26	28	32
Fonte grise	16	8,5	17	9	21	10,5
Acier (Rr) e = 40 kg/mm²	14	14	15	16	19	18
——— 60 ———	12	9	13	10	16	12
——— 80 ———	10	5	11	6	13	6,5
——— 100 ———	9,5	1,5	10	1,75	11	2
——— 110 ———	8	0,05	9	0,32	10	0,35

Tableau N° 8 _ Vitesses de moindre usure et débits correspondants pour fraisage avec faible lubrification dans les conditions types :
_ largeur de coupe plus profondeur de passe = 50 mm.
_ avance par tour et par dent = 0, 05 mm.

Métal travaillé	Outil en acier fondu		Outil en A.R.O		Outil en A.R.S	
	V_o	D_o	V_o	D_o	V_o	D_o
Laiton	400	30	800	50	1000	65
Bronze 90% Cu, 10% Sn	320	22	620	40	760	50
Fonte grise	160	2	320	5,5	380	8
Acier (Rr)e = 40 kg/mm²	120	7,5	220	15	280	19
——— 60 ———	50	3	105	7	140	9
——— 80 ———	10	0,5	40	2,5	70	4,5
——— 100 ———			10	0,6	20	1
——— 110 ———			3	0,2	5	0,25

Tableau N° 9 – *Vitesses de moindre usure et débits correspondants pour perçage avec lubrification sous pression dans les conditions types :*
– diamètre du foret = 25 mm,
– avance par tour = 0,25 mm.

Résumé

Les nombreux essais réalisés par le commandant DENIS sur la coupe des métaux ont montré que la vitesse de moindre usure varie d'après les facteurs suivants :

Mode de travail. **Quel que soit le mode de travail, les courbes de débit sont de même forme ; elles montrent que l'outil à charioter est celui qui a le plus grand débit.**

Nature du matériau à outil. **Pour un même métal, usiné dans les mêmes conditions de travail, la vitesse de moindre usure et le débit correspondant augmentent quand les qualités du matériau à outil s'améliorent.**

Ténacité ou dureté du métal usiné. **Pour un même outil, travaillant dans les mêmes conditions de coupe, la vitesse de moindre usure et le débit correspondant diminuent lorsque la ténacité ou la dureté du métal usiné augmentent.**

Refroidissement de l'outil et de la pièce. **L'absorption, par arrosage abondant de l'outil et de la pièce, de la chaleur dégagée par le détachement du copeau, permet d'augmenter la vitesse de moindre usure mais le débit reste constant.**

Section du copeau. **Pour un même outil, travaillant un même métal dans les mêmes conditions de refroidissement, la vitesse de moindre usure augmente avec la diminution de la section du copeau mais le débit reste constant.**

D'après la *loi du débit constant,* les différentes vitesses de moindre usure, profondeurs de passe et avances sont liées par la relation $a_0^2\ p_0\ V_0^3 = a_1^2\ p_1\ V_1^3 =$ constante, de laquelle on tire la vitesse de coupe

$$V_1 = V_0 \sqrt[3]{\frac{a_0^2\ p_0}{a_1^2\ p_1}}$$

correspondant aux conditions a_1 et p_1 imposées par la machine et par le travail à exécuter.

VITESSE DE COUPE (Suite)

CORRECTION DE LA VITESSE DE COUPE

Un travail à l'outil de coupe n'est pas souvent réalisable dans les conditions types de coupe. Pour obtenir le rendement maximum, il faut corriger la vitesse de moindre usure en l'adaptant aux conditions qui dépendent du genre de travail et des possibilités de la machine. On utilise les tableaux du commandant DENIS et on corrige en appliquant la loi du débit constant.

Pour fixer les idées sur cette question importante, nous allons traiter successivement des cas de tournage, de fraisage et de perçage.

I. — CHARIOTAGE AU TOUR

1er exemple. Soit à exécuter un chariotage de finition sur des pièces en acier $(\mathbf{R}_r)_e = 40$ *kg/mm²*. Diamètre d'ébauche 61 *mm*, diamètre à obtenir 60 *mm*. Travail à sec, avance 0,2 *mm*, outil en **A. R. S.**

A quelle vitesse de coupe doit être réalisé le travail ?

Solution.

Conditions types :

Le tableau n° 7 donne

$\mathbf{V}_o = 31$ *m/mn* ; $\mathbf{D}_o = 23$ dm³

$\mathbf{a}_o = 0{,}5$ *mm* ; $\mathbf{p}_o = 5$ *mm*

Travail à sec.

Conditions d'utilisation :

$\mathbf{a}_{o1} = 0{,}2$ *mm* ; $\mathbf{p}_{o1} = \dfrac{61-60}{2} = 0{,}5$ *mm*

Travail à sec.

D'après la loi du débit constant on a :

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_o \sqrt[3]{\frac{\mathbf{a}_o^2\ \mathbf{p}_o}{\mathbf{a}_1^2\ \mathbf{p}_1}} = 31 \times \sqrt[3]{\frac{0{,}5^2 \times 5}{0{,}2^2 \times 0{,}5}} \simeq 124\ m/mn$$

2e exemple. Exécution d'un chariotage d'ébauche sur des pièces en acier à 80 *kg/mm²* Diamètre brut : 75 *mm*, diamètre à obtenir : 71 *mm*, longueur à charioter : 150 *mm*. Travail sous lubrification abondante, $\mathbf{a} = 0{,}6$ *mm*, outil en **A. R. S.**

Vitesses de rotation de la broche : 32, 40, 50, 80, 125, 200, 320 et 500 *tr/mn*.

Quelle est la vitesse de coupe à utiliser ?

Solution.

Conditions types :

D'après le tableau n° 7

$\mathbf{V}_o = 14\ m/mn$; $\mathbf{D}_o = 9\ dm^3$

$\mathbf{a}_o = 0{,}5\ mm$; $\mathbf{p}_o = 5\ mm$

Travail à sec.

Conditions d'utilisation :

$\mathbf{a}_{o1} = 0{,}6\ mm$; $\mathbf{p}_{o1} = \dfrac{75-71}{2} = 2\ mm$

Travail sous lubrification abondante

La loi du débit constant donne :

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_o \sqrt[3]{\frac{\mathbf{a}_o^2\ \mathbf{p}_o}{\mathbf{a}_1^2\ \mathbf{p}_1}} = 14 \sqrt[3]{\frac{0{,}5^2 \times 5}{0{,}6^2 \times 2}} \simeq 16\ m/mn$$

Sous arrosage abondant cette vitesse devient :

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_1 \times 1{,}5 = 16 \times 1{,}5 = 24\ m/mn$$

La vitesse pour ébauche est la vitesse économique $\mathbf{V}_e$:

$$\mathbf{V}_e = \frac{4}{3}\mathbf{V}_2 = 24 \times \frac{4}{3} = 32\ m/mn$$

Nombre de tours-minute correspondant :

$$\mathbf{N} = \frac{1\,000\,\mathbf{V}}{\pi\ \mathbf{D}} = \frac{1\,000 \times 32}{3{,}14 \times 75} = 136\ tr/mn$$

On choisira la vitesse de rotation 125 *tr/mn*.

Calcul du nombre de pièces entre deux affûtages

La vitesse $\mathbf{V}_e$ réelle est :

$$\mathbf{V} = \frac{\pi\ \mathbf{D}\ \mathbf{N}}{1\,000} = \frac{3{,}14 \times 75 \times 125}{1\,000} \simeq 30\ m/mn$$

D'après le tableau n° 6, cette vitesse correspond à :

$$\mathbf{V}_e = \mathbf{V}_o + \frac{1}{4}\mathbf{V}_o = 24 + \frac{24 \times 1}{4} = 30\ m/mn$$

On prendra comme débit $\mathbf{D}_e = 0{,}8\ \mathbf{D}_o = 0{,}8 \times 9 = 7{,}2\ dm^3$.

Volume de copeaux enlevé sur chaque pièce :

$$\mathbf{v} = 1{,}5 \times \frac{3{,}14 \times (0{,}75^2 - 0{,}71^2)}{4} = 0{,}069\ dm^3$$

Nombre de pièces : $\dfrac{\mathbf{D}_e}{\mathbf{v}} = \dfrac{7{,}2}{0{,}069} = 104$ pièces.

3e exemple (1). Chariotage d'ébauche, avec un outil en A. R. S., de pièces en acier à 50 kg/mm^2. Diamètre brut : 45 *mm*, diamètre après chariotage : 40 *mm* longueur de chariotage : 120 *mm*. Le travail se fera sous lubrification abondante.

Vitesses de rotation de la broche : 32, 40, 50, 80, 125, 200, 320 et 500 *tr/mn*.

Avances en *mm* : 0,1 — 0,2 — 0,3 — 0,4 — 0,5 — 0,6 — 0,8 — 1 — 1,25 — 1,5 et 2.

Quelle est la vitesse de coupe à employer ?

Solution.

Conditions types :	**Conditions d'utilisation :**
$\mathbf{V}_o = 26\ m/mn$; $\mathbf{D}_o = 19\ dm^3$	$\mathbf{p}_{o1} = \dfrac{45 - 40}{2} = 2{,}5\ mm$
$\mathbf{a}_o = 0{,}5\ mm$; $\mathbf{p}_o = 5\ mm$	
Travail à sec.	Travail sous lubrification abondante.

Avec lubrification abondante, la vitesse $\mathbf{V}_o$ corrigée devient :

$$\mathbf{V}_{oa} = 1{,}5\ \mathbf{V}_o = 26 \times 1{,}5 = 39\ m/mn$$

Choisissons comme avance 0,6 *mm*.

D'après la loi du débit constant on peut écrire pour la vitesse de moindre usure $\mathbf{V}_{o1}$ après deuxième correction :

$$\mathbf{V}_{o1} = \mathbf{V}_{oa} \sqrt[3]{\frac{\mathbf{a}_o^2 \times \mathbf{p}_o}{\mathbf{a}_1^2 \times \mathbf{p}_1}} = 39 \times \sqrt[3]{\frac{0{,}5^2 \times 5}{0{,}6^2 \times 2{,}5}} \simeq 42\ m/mn$$

La vitesse économique $\mathbf{V}_e$ est :

$$\mathbf{V}_e = \frac{42 \times 4}{3} = 56\ m/mn$$

Nombre de tours-minute correspondant :

$$\mathbf{N} = \frac{1\,000\ \mathbf{V}}{\pi\ \mathbf{D}} = \frac{1\,000 \times 56}{3{,}14 \times 45} = 400\ tr/mn$$

La vitesse de rotation de la broche la plus rapprochée est 320 *tr/mn* qui donne une vitesse de coupe réelle

$$\mathbf{V} = \frac{\pi\ \mathbf{D}\ \mathbf{N}}{1\,000} = \frac{3{,}14 \times 45 \times 320}{1\,000} = 46\ m/mn$$

Cette solution n'est pas acceptable car la vitesse de coupe réelle 46 *m/mn* est trop différente de la vitesse de coupe théorique 56 *m/mn*. Comme nous ne pouvons modifier le nombre de tours de la broche, nous agirons sur la section du copeau en conservant une passe égale à 2,5 *mm*.

(1) Cet exemple traite le cas général.

Calculons la vitesse de moindre usure $\mathbf{V}_{o2}$ avec lubrification pour une vitesse économique $\mathbf{V}_e = 46\ m/mn$

$$\mathbf{V}_{o2} = \frac{3}{4}\mathbf{V}_e = \frac{46 \times 3}{4} = 34{,}5\ m/mn$$

La loi du débit constant $\mathbf{a}_1^2\,\mathbf{p}_1\,\mathbf{V}_1^3 = \mathbf{a}_2^2\,\mathbf{p}_2\,\mathbf{V}_2^3$ nous permet de poser :

$$\mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_1\sqrt[2]{\frac{\mathbf{p}_1\,\mathbf{V}_1^3}{\mathbf{p}_2\,\mathbf{V}_2^3}} = 0{,}5\sqrt[2]{\frac{5 \times 39^3}{2{,}5 \times 34{,}5^3}} \simeq 0{,}8\ mm$$

Cette avance étant permise par la machine, finalement nous adopterons :

$$\mathbf{V}_e = 46\ m/mn,\ \mathbf{N} = 320\ tr/mn,\ \mathbf{p} = 2{,}5\ mm,\ \mathbf{a} = 0{,}8\ mm$$

Calcul du nombre de pièces tournées entre deux affûtages :

Débit de l'outil pour $\mathbf{V}_e = 46\ m/mn$:

$$\mathbf{D}_e = \frac{\mathbf{D}_o}{2} = \frac{19}{2} = 9{,}5\ dm^3$$

Volume de copeau enlevé sur chaque pièce :

$$\mathbf{v} = 3{,}14 \times \frac{0{,}45^2 - 0{,}4^2}{4} \times 1{,}2 = 0{,}037\ dm^3$$

Nombre de pièces tournées :

$$\frac{\mathbf{D}_e}{\mathbf{v}} = \frac{9{,}5}{0{,}037} = 256 \text{ pièces.}$$

Calcul de la durée de l'outil :

Cette durée est égale à :

$$\frac{\text{Longueur totale chariotée entre deux affûtages}}{\text{Longueur chariotée en une minute}} = \frac{120 \times 256}{0{,}8 \times 320} = 120\ mn = 2\ \text{h}$$

II. — FRAISAGE

Exemple. Taillage à la fraise 3 tailles en **A. R. S.** d'une rainure de 15 *mm* de large sur 4 *mm* de profondeur dans un prisme en acier mi-dur à 60 kg/mm^2 avec emploi de $\mathbf{V}_o$ sous lubrification abondante. Diamètre de la fraise : 200 *mm*, avance 0,1 *mm* par tour et par dent, longueur de la pièce 105 *mm*.

Quelle doit être la vitesse de rotation de la fraise ?

Solution.

Conditions types :

Le tableau n° 8 indique :

$\mathbf{V}_o = 16\ m/mn$; $\mathbf{D}_o = 12\ dm^3$

$\mathbf{a}_o = 0{,}05\ mm$;

$\mathbf{s} = \mathbf{p} + \mathbf{c} = 50\ mm$

Travail sous faible arrosage.

Conditions d'utilisation :

$\mathbf{s}_{o1} = 4 + 15 = 19\ mm$

$\mathbf{a}_{o1} = 0{,}1\ mm$

Travail sous lubrification abondante.

La loi du débit constant nous donne :

$$\mathbf{V}_{o1} = \mathbf{V}_o \sqrt[3]{\frac{\mathbf{a}_o^2\ \mathbf{s}_o}{\mathbf{a}_1^2\ \mathbf{s}_1}} = 16 \sqrt[3]{\frac{0{,}05^2 \times 50}{0{,}1^2 \times 19}} \simeq 14\ m/mn$$

Sous lubrification abondante $\mathbf{V}_{o1}$ devient :

$$\mathbf{V}_{o1} = \mathbf{V}_{o2} \times 1{,}25 = 14 \times 1{,}25 = 17{,}5\ m/mn$$

Nombre de tours-minute de la fraise :

$$\mathbf{N} = \frac{1\,000\,\mathbf{V}}{\pi\ \mathbf{D}} = \frac{1\,000 \times 17{,}5}{3{,}14 \times 200} \simeq 28\ tr/mn$$

Calcul du nombre de pièces avant affûtage :

Volume d'une rainure :

$$\mathbf{v} = 15 \times 4 \times 105 = 6\,300\ mm^3 = 0{,}0063\ dm^3$$

Nombre de pièces avant affûtage :

$$\frac{\mathbf{D}_o}{\mathbf{v}} = \frac{12}{0{,}0063} = 1\,900 \text{ pièces.}$$

III. — PERÇAGE

Exemple. Perçage de trous débouchants à l'aide d'un foret en **A. R. S.** de 13 *mm* de diamètre, dans des pièces en acier doux $(\mathbf{R}_r)_e = 40\ kg/mm^2$ et d'épaisseur 20 *mm*. Le travail se fera sous lubrification abondante avec l'avance maximum, soit 0,2 *mm*. Quelle est la vitesse de rotation de la broche de la perceuse ?

Solution.

Conditions types :

Le tableau n° 9 donne :

$\mathbf{N}_o = 280\ tr/mn$; $\mathbf{D}_o = 19\ dm^3$;

Diamètre $\mathbf{d}_o$ du foret : 25 *mm*,

$\mathbf{a}^\circ = 0{,}25\ mm$ par tour.

Travail sous lubrification abondante.

Conditions d'utilisation :

Diamètre $\mathbf{d}_o$ du foret : 13 *mm*.

Travail sans lubrification abondante.

Dans la relation $\mathbf{V} = \dfrac{\pi\ \mathbf{d}\ \mathbf{N}}{1\,000}$, π et 1 000 sont des constantes; donc $\mathbf{V}$ est proportionnelle à $\mathbf{d}$ et à $\mathbf{N}$.

D'autre part, pour le foret, $\mathbf{p} = \dfrac{\mathbf{d}}{2}$, si bien que pour le perçage la loi du débit constant s'écrit : $\mathbf{a}_o^2 \dfrac{\mathbf{d}_o}{2} \mathbf{d}_o^3 \mathbf{N}_o^3 = \mathbf{a}_1^2 \dfrac{\mathbf{d}_1}{2} \mathbf{d}_1^3 \mathbf{N}_1^3$

ou encore après simplification $\mathbf{a}_o^2\ \mathbf{d}_o^4\ \mathbf{N}_o^3 = \mathbf{a}_1^2\ \mathbf{d}_1^4\ \mathbf{N}_1^3$.

$$\text{Donc } \mathbf{N}_1 = \mathbf{N}_o \sqrt[3]{\frac{\mathbf{a}_o^2\ \mathbf{d}_o^4}{\mathbf{a}_1^2\ \mathbf{d}_1^4}} = 280 \sqrt[3]{\frac{0{,}25^2 \times 25^4}{0{,}2^2 \times 13^4}} = 840\ tr/mn$$

Nous emploierons la vitesse économique puisque l'outil est facile à affûter et à monter : $\mathbf{N}_e = \mathbf{N}_1 \times 1{,}5 = 840 \times 1{,}5 = 1\,260\ tr/mn$

Nombre de trous percés avant affûtage :

Volume d'un trou : $\mathbf{v} = \dfrac{3{,}14 \times 13^2}{4} \times 20 = 2\,650\ mm^3 = 0{,}00265\ dm^3$.

Nombre de trous : $\dfrac{\mathbf{D}_e}{\mathbf{v}} = \dfrac{\mathbf{D}_o}{2\,\mathbf{v}} = \dfrac{19}{2 \times 0{,}00265} = 3\,584$ trous.

IV. — RÈGLES DE CORRECTION

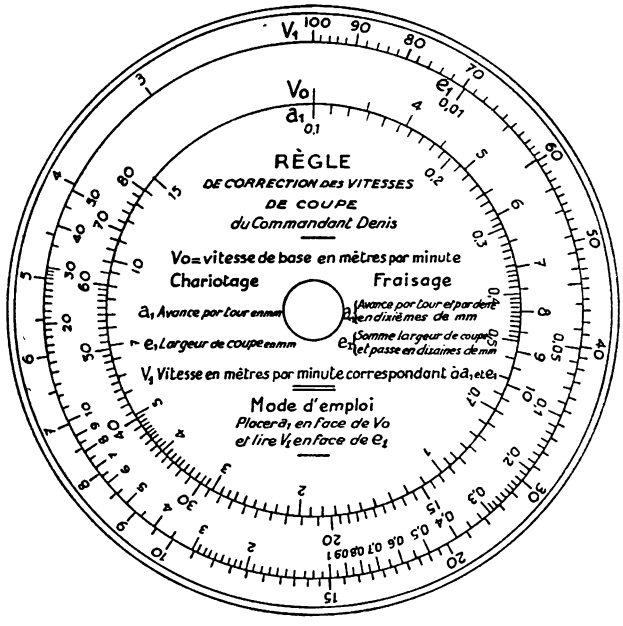


FIG 197 — *Recto d'une règle de correction du Cdt Denis pour le tournage et le fraisage.*

Pour éviter les calculs de correction de la vitesse de coupe, qui sont toujours causes d'erreurs et de perte de temps, il est possible d'employer des règles de correction.

Ces règles peuvent être droites ou circulaires. La figure 197 représente le recto d'une règle circulaire Morin (1) pour le chariotage et le fraisage. Sur le verso figurent une courbe de débit et des tableaux semblables à ceux nos 7 et 8 ainsi que les relations :

$$\mathbf{V}_e = \frac{4}{3}\mathbf{V}_o \quad \text{et} \quad \mathbf{D}_e = \frac{\mathbf{D}_o}{2}$$

(1) Etablissements Morin, 11, rue Dulong, Paris.

V. — ABAQUES

Les abaques sont des graphiques qui donnent sans calcul la résolution de relations et formules diverses.

En ce qui concerne les problèmes se rapportant aux vitesses de coupe on utilise surtout :

A. LES ABAQUES RAYONNANTS

Dans la relation $\mathbf{V} = \dfrac{\pi\,\mathbf{D}\,\mathbf{N}}{1\,000}$ si **N** est la constante et **D** la variable connue on a :

$$\mathbf{V} = \left(\frac{\pi\,\mathbf{N}}{1\,000}\right)\mathbf{D} \text{ qui est de la forme } \mathbf{y} = \mathbf{a}\,\mathbf{x}.$$

La courbe représentative de la fonction **V** est donc une droite qui dépend de **N** puisque dans $\dfrac{\pi\,\mathbf{N}}{1\,000}$, $\dfrac{\pi}{1\,000}$ est constant (fig. 198).

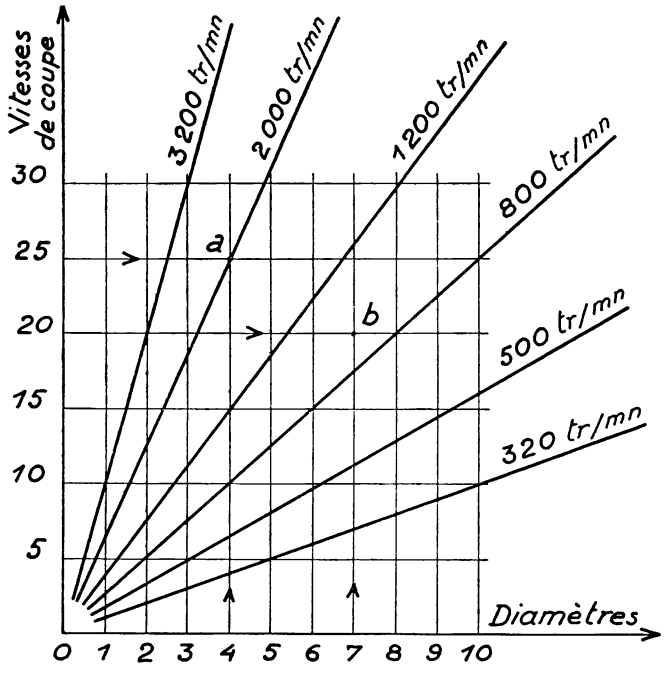


FIG 198. *Abaque rayonnant relatif à une perceuse de capacité 10mm équipée de deux poulies pouvant se permuter pour donner six vitesses de rotation.*

Si la machine possède une gamme de six vitesses de rotation, il y aura six droites sur le graphique.

Emploi et lecture du graphique. 1° Pour déterminer le nombre de tours-minute que doit effectuer un foret de 4 *mm* devant travailler à 25 *m/mn*, suivre l'ordonnée 25 *m/mn* jusqu'à sa rencontre en **a** avec l'abscisse 4 *mm*. Le nombre de tours est 2 000.

2° La détermination du nombre de tours-minute d'un foret de 7 *mm* perçant à la vitesse de coupe 20 *m/mn* conduit au point **b** situé entre les droites des 800 et 1 200 *tr/mn*. On prendra la vitesse la plus rapprochée par défaut, soit 800 *tr/mn*.

Remarque. Un abaque de la même forme peut être construit pour machine à raboter à condition toutefois de porter en abscisses les courses et en ordonnées les vitesses de coupe.

B. LES ABAQUES HYPERBOLIQUES

De la relation $\mathbf{V} = \frac{\pi \mathbf{D N}}{1\,000}$ on tire $\mathbf{N} = \frac{1\,000\,\mathbf{V}}{\pi\,\mathbf{D}}$. Pour une même vitesse et des diamètres différents on a $\mathbf{N} = \frac{\left(\frac{1\,000\,\mathbf{V}}{\pi}\right)}{\mathbf{D}}$ qui est de la forme $\mathbf{y} = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{x}}$. La courbe représentative est donc une hyperbole qui se rapporte à la vitesse de coupe (fig. 199).

Il est possible de tracer sur le même graphique plusieurs courbes représentant des vitesses de coupe différentes.

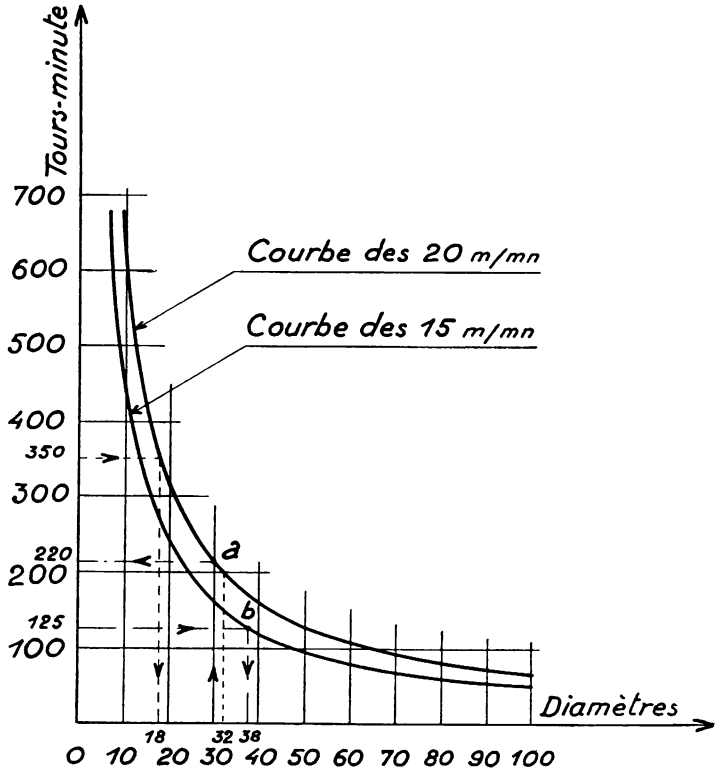


FIG 199. *Abaques hyperboliques des vitesses de coupe 15 et 20 m/mn pour les diamètres de 0 à 100 mm.*

Emploi et lecture du graphique. Un tour possède les vitesses de rotation suivantes : 80, 125, 200, 350, 500 et 800 *tr/mn*.

a) Quel nombre de tours faut-il choisir pour travailler une pièce de 30 *mm* de diamètre à la vitesse de coupe de 20 *m/mn* ?

Suivre l'abscisse 30 *mm* jusqu'à sa rencontre en **a** avec la courbe des 20 *m/mn*. En suivant l'ordonnée de **a** on trouve 220 *tr/mn* environ. Choisir la vitesse inférieure autorisée par le tour soit 200 *tr/mn*.

b) A la vitesse de coupe de 15 *m/mn*, quel diamètre peut-on admettre pour une vitesse de rotation de 125 *tr/mn* ?

L'ordonnée de 125 *tr/mn* rencontre la courbe des 15 *m/mn* en **b**. A ce point correspond l'abscisse 38 *mm*.

c) Sur la courbe des 20 *m/mn*, à 200 *tr/mn* correspond un diamètre de 32 *mm* environ et à 350 *tr/mn* correspond approximativement un diamètre de 18 *mm*.

Donc, on peut admettre tous les diamètres compris entre 18 *mm* exclus et 32 *mm* inclus à la vitesse de coupe de 20 *m/mn*.

Remarques. 1° Le graphique peut servir pour machine à raboter si l'on substitue aux nombres de tours le nombre de battements et aux diamètres les courses.

2° La précision du graphique est douteuse vers les extrémités de la courbe. D'ailleurs en tous autres points, la précision est assez faible car l'hyperbole est d'un tracé peu facile.

C. LES ABAQUES LOGARITHMIQUES

La relation $\mathbf{N} = \dfrac{1\,000\ \mathbf{V}}{\pi\ \mathbf{D}}$ s'écrit aussi $\mathbf{N} = \left(\dfrac{1\,000}{\pi}\right) \times \dfrac{\mathbf{V}}{\mathbf{D}}$.

Si l'on résout cette dernière équation par calculs logarithmiques on a :

$\log \mathbf{N} = \log \left(\dfrac{1\,000}{\pi}\right) + \log \mathbf{V} - \log \mathbf{D}$ ou $\log \mathbf{N} = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 - \log \mathbf{D}$ car $\left(\dfrac{1\,000}{\pi}\right)$ et $\mathbf{V}$ sont des constantes ; leurs logarithmes sont donc les constantes $\mathbf{K}_1$ et $\mathbf{K}_2$.

On verra en mathématiques que le **log** de **N** représente le nombre **N** et que le **log** de **D** représente le nombre **D**.

Par suite cette relation peut se mettre sous la forme $\mathbf{y} = -\log \mathbf{D} + (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2)$ ou encore $\mathbf{y} = \mathbf{a}\,\mathbf{x} + \mathbf{b}$ dans laquelle le coefficient **a** est négatif et égal à 1.

La courbe représentative de **N** en fonction de **D**, **pour chaque valeur constante de V**, est donc une droite (fig. 200).

C'est l'hyperbole précédente redressée, ce qui augmente la précision de la lecture.

Ces graphiques s'emploient et se lisent comme les précédents. La graduation des axes de coordonnées est cependant délicate.

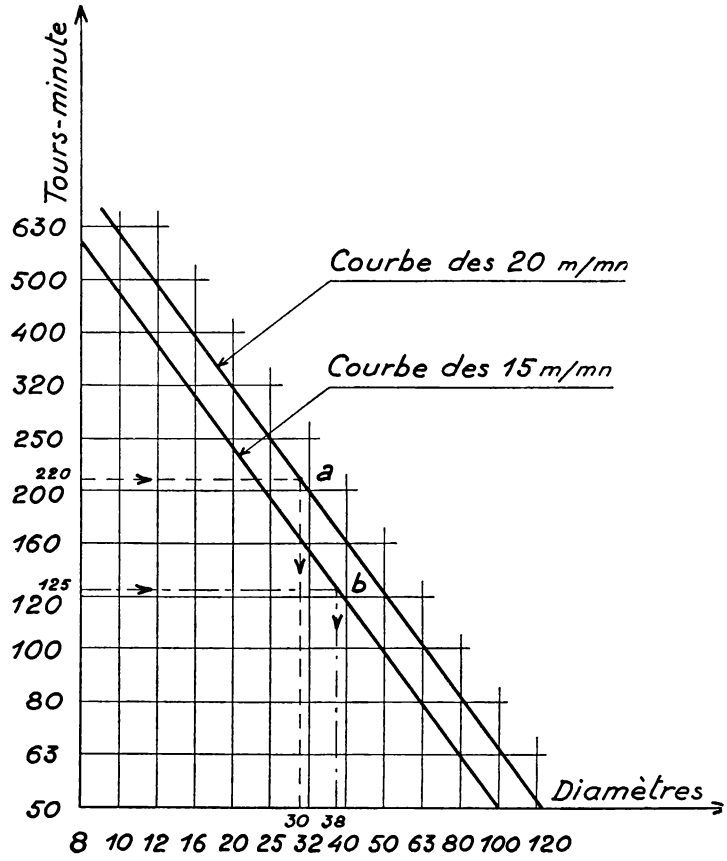


FIG 200_ *Abaques logarithmiques des vitesses de coupe 15 et 20 m/mn pour les diamètres 8 à 100 mm.*

Résumé

Les conditions types de coupe sont rarement applicables. Il faut donc, pour assurer le rendement maximum de l'outil et de la machine corriger la vitesse de coupe de base pour l'adapter aux conditions de coupe imposées.

Cette correction est effectuée par l'application :

— de la loi du débit constant,

— de la relation liant le travail à sec au travail sous arrosage,

— de la relation liant la vitesse économique à la vitesse de moindre usure.

Afin d'obtenir les résultats rapidement et sans calcul, on peut utiliser des règles de correction et des abaques.

VITESSE DE COUPE (Fin)

VITESSE DE COUPE POUR LES OUTILS EN CARBURES MÉTALLIQUES

I. — GÉNÉRALITÉS

La vitesse de coupe d'un outil en acier dépend de sa dureté et de son aptitude à conserver cette dureté malgré son échauffement.

Pour les outils en carbures métalliques, la dureté ne peut être prise comme critère déterminant de l'emploi. Bien qu'il n'y ait pas, sous l'échauffement, changement de structure comme pour les aciers trempés, il y a néanmoins diminution de la dureté des carbures en fonction de la température et vers 800° ils commencent à s'oxyder.

Seule la nuance, c'est-à-dire la différence provenant de leur composition, détermine leur emploi.

Remarquons aussi que la résistance à la rupture à la compression des carbures est très grande : 400 à 420 kg/mm^2, tandis que leur résistance à la rupture à la flexion est relativement faible. Ceci montre tout l'intérêt qu'il y a à faire travailler la mise à la compression et pourquoi elle ne doit pas déborder son support.

D'autre part, l'expérience prouve qu'une mise amincie par les affûtages successifs a une moins bonne tenue de coupe qu'une plaquette neuve. Cette particularité s'explique par le fait que les carbures ont une conductibilité thermique plus faible que celle de l'acier constituant le support et que, par suite, une section plus forte a une meilleure résistance aux variations de température (chocs thermiques).

Selon les nuances, la dureté des carbures en **Rockwell C** est comprise entre 75 et 83 et leurs emplois sont les suivants :

II. — ADAPTATION DE LA NUANCE AU TRAVAIL A EXÉCUTER (1)

A. USINAGE DE L'ACIER

1° Nuance S_o (gris). Ce sont des carbures très durs et très fragiles. Ils doivent travailler sans chocs, à grande vitesse de coupe et faible section de copeau.

Carbures de superfinition, ils doivent être utilisés sur des machines modernes à grande vitesse de rotation et en parfait état mécanique, afin d'éviter le broutement, et sur des pièces ébauchées. Exigent un affûtage très soigné.

(1) D'après « Le Carbone Lorraine » (Carboram), 48, rue des Acacias, Paris (17e).

2° **Nuance S_1 (noir).** Ces carbures ont une grande dureté et une grande fragilité, et doivent travailler sans chocs, à vitesse de coupe élevée et faible avance. Conviennent très bien pour les aciers au carbone traités jusqu'à 140 kg/mm^2.

Carbures de finition à utiliser sur des machines modernes en parfait état mécanique et sur pièces déjà ébauchées. Exigent un affûtage très soigné.

3° **Nuance S_2 (blanc).** Moins durs et moins fragiles que les précédents, ils ne peuvent usiner des métaux très durs et doivent travailler à des vitesses de coupe moyennes.

Carbures d'ébauche qui supportent assez bien les chocs et les fortes avances, ils sont utilisés pour l'usinage des pièces calaminées ou présentant des interruptions de coupe et peuvent être montés sur machines anciennes pourvu qu'elles soient puissantes et en bon état mécanique. Demandent un affûtage soigné.

4° **Nuance S_3 (rouge).** Ces carbures sont tenaces et supportent bien les fortes passes, les chocs et les vibrations. Conviennent très bien pour l'usinage des aciers moulés.

Carbures d'ébauche qui peuvent être utilisés sur machines anciennes mais puissantes et de bonne qualité et être montés sur étaux-limeurs et raboteuses. Demandent également un affûtage soigné.

B. USINAGE DES FONTES ET MÉTAUX NON FERREUX

1° **Nuance G_1 (bleu).** Carbures pour l'usinage des fontes douces, des bronzes, des laitons et des métaux légers.

2° **Nuance H_1 (jaune).** Carbures pour l'usinage des fontes dures, du verre. des pierres et de la porcelaine.

3° **Nuance H_2 (jaune et noir).** Carbures réservés à l'usinage des fontes les plus dures (fontes trempées).

III. — CONDITIONS DE COUPE DES CARBURES MÉTALLIQUES

Bien qu'il ne puisse être fait état d'essais systématiques concernant les carbures métalliques, on peut, d'après les travaux de M. Combes, ingénieur civil des mines, admettre les règles générales suivantes :

a) Chaque carbure possède, pour un métal travaillé donné, des vitesses limites maximum et minimum d'utilisation.

b) Il ne faut pas descendre au-dessous de la vitesse minimum sans quoi l'outil s'use très vite et la surface usinée devient rugueuse.

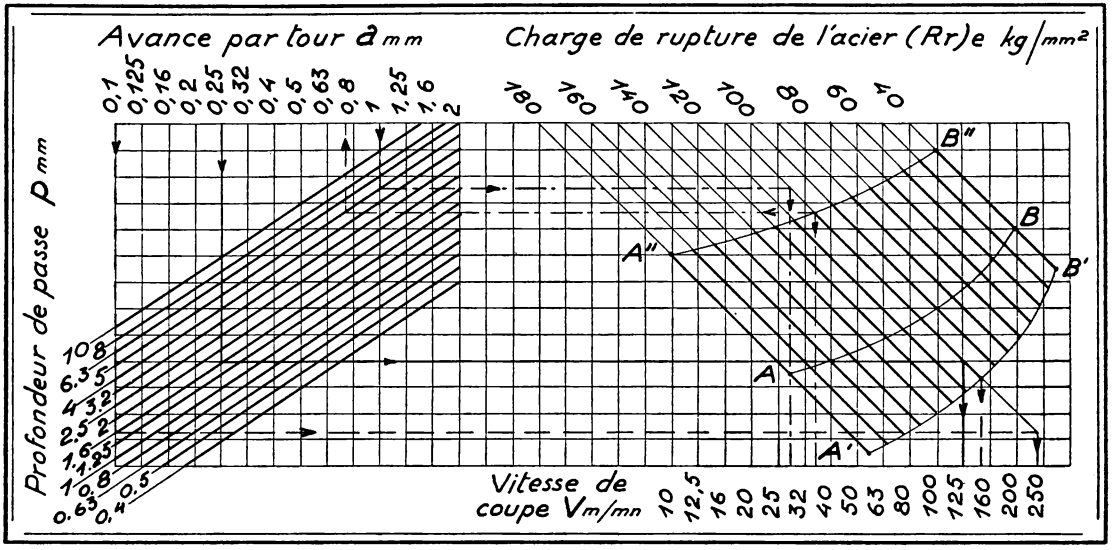
c) La vitesse de coupe doit être constante (exempte d'à-coups) pendant le travail pour éviter la détérioration rapide de l'outil.

d) La vitesse de coupe étant très élevée, la section du copeau doit être relativement faible.

ABAQUES POUR DÉTERMINER LES CONDITIONS DE COUPE POUR LE CHARIOTAGE AVEC OUTILS EN CARBURES MÉTALLIQUES (D'après les travaux de M. Combes).

Ces abaques (abaques n° 1 et n° 2) sont pour travail à sec et pour une durée de 1 *h* 30 *mn*. On obtient le débit de l'outil en appliquant la relation

$$\mathbf{D}\ dm^3 = 0{,}09\ \mathbf{V}\ m/mn\ \mathbf{a}\ mm\ \mathbf{p}\ mm$$



Abaque N° 1 _ *Carbures nuance S1 pour les travaux de finition de l'acier, à grande vitesse et faible avance. Ne pas utiliser ces outils pour l'écroutage sur la calamine. Pour l'acier moulé, réduire les vitesses de moitié. Choisir de préférence une vitesse de coupe voisine de la moyenne avec faible avance. Rester entre les limites d'utilisation AB et A'B' pour a < 0,6, AB et A"B" pour a > 0,6.*

La vitesse de coupe donnée est pour un temps de coupe de 1h 30mn.

Utilisation de l'abaque N° 1.

1er Exemple : A quelle vitesse de coupe doit travailler un outil nuance S_1 chariotant au tour, à sec, un acier à 110 *kg/mm²* pour **a** = 0,25 *mm* et **p** = 1,6 *mm*.

Partant de **a** = 0,25 on trouve **V** = 125 *m/mn*. L'avance 0,25 étant plus petite que 0,6 et la vitesse de coupe se trouvant dans la zone délimitée par **A B** et **A' B'** pour laquelle **a** < 0,6, cette vitesse est acceptable.

2e Exemple : Conservons le même acier, le même outil et la même profondeur de passe mais prenons **a** = 0,1 *mm*.

De **a** = 0,1 on arrive en dehors de la zone d'utilisation et à une vitesse de 240 *m/mn* qui est trop élevée. Il faut donc modifier les conditions de passe ; on prendra la plus grande vitesse permise soit 150 *m/mn* environ.

3e Exemple : Conservons encore le même acier et le même outil, mais supposons $a = 1$ *mm* et $p = 5$ *mm*.

Nous trouvons $V = 27$ *m/mm* qui se lit hors de la zone pour laquelle $a > 0{,}6$. Il faut donc prendre la plus faible valeur autorisée pour cette zone et pour cet acier, soit environ 35 *m/mm*, et adapter l'avance en prenant $a = 0{,}7$ si l'on veut conserver $p = 5$.

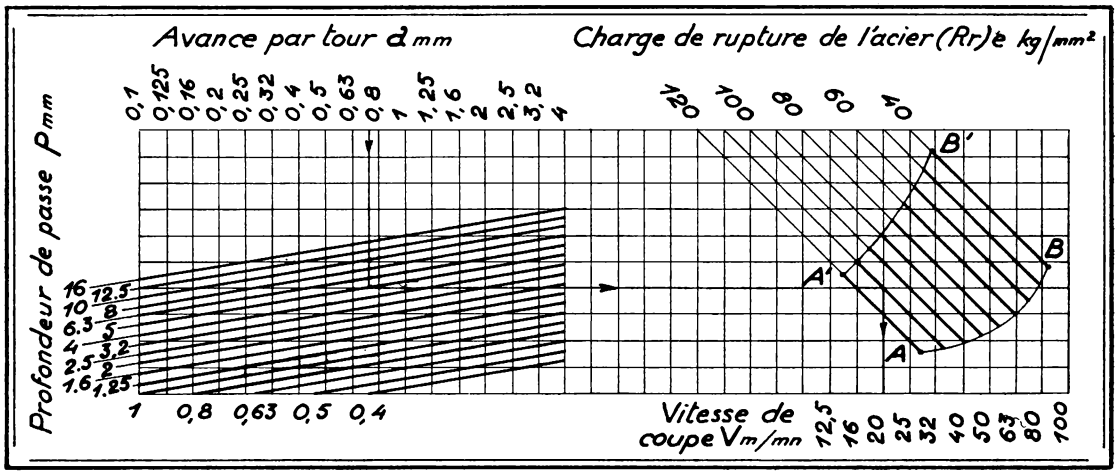
Remarque. Il est très intéressant de comparer la production obtenue avec l'outil en carbure nuance S_1 et un outil en **A. R. S.**

D'après le tableau n° 7 du commandant DENIS, $V_o = 5$ *m/mn*. Dans les conditions de coupe du 1er exemple on a :

$$V_1 = V_o \sqrt{\frac{a_o^2\, p_o}{a_1^2\, p_1}} = 5 \sqrt{\frac{0{,}52 \times 5}{0{,}25^2 \times 1{,}6}} = 8 \text{ m/mn}$$

$$V_e = V_o \times 1{,}5 = 8 \times 1{,}5 = 12 \text{ m/mn}.$$

Les deux sections de copeau étant égales, le rapport des productions est sensiblement égal au rapport des vitesses de coupe, soit $\frac{125}{12} \simeq 10$ soit environ une production 10 fois plus grande avec l'outil nuance S_1.



Abaque N° 2. *Carbures nuance S3 pour les travaux de grosse ébauche de l'acier, à faible vitesse et grande avance. Ces outils peuvent supporter des chocs. Pour l'acier moulé, réduire les vitesses de moitié. Choisir de préférence une vitesse de coupe voisine du minimum et une très forte avance. Rester entre les limites d'utilisation A B et A' B'.*

La vitesse de coupe donnée est pour un temps de coupe de $1^h 30^{mn}$

Exemple d'utilisation de l'abaque N° 2.

A l'aide de l'abaque, déterminons la vitesse de coupe d'un outil nuance S_3 travaillant, comme dans le troisième exemple d'utilisation d'un outil nuance S_1, un acier $(R_r)_e = 110$ *kg/mm²* dans les mêmes conditions **a** = 0,7 *mm*, **p** = 5 *mm*, travail à sec.

Nous trouvons **V** = 20 *m/mm*.

Pour le carbure S_1 la vitesse trouvée était 35 *m/mm*. Le rapport des deux vitesses est $\frac{35}{20} = 1{,}75$ soit très près de 2.

Ceci confirme ce qui a été dit au début de cette leçon, que la nuance du carbure est le seul facteur qui détermine les conditions d'emploi. Donc, pour l'achat des outils en carbures il faut adapter l'usage qu'on veut en faire à leurs possibilités. Toute disposition contraire donnera lieu à de graves mécomptes.

Nota. Les abaques précédents ne constituent que des exemples choisis parmi toute une gamme relative aux différents matériaux à usiner, y compris les matières isolantes et les matières plastiques.

Résumé

L'emploi et la vitesse de coupe d'un outil en carbures métalliques dépendent uniquement de sa nuance.

Pour l'usinage des aciers on utilise les carbures des nuances suivantes :

— *Nuance* S_0 pour travaux de superfinition sans chocs, à très grande vitesse de coupe sous faible section de copeau;

— *Nuance* S_1 pour travaux de finition sans chocs, avec vitesse de coupe élevée et avance inférieure à 1 *mm*;

— *Nuance* S_2 pour travaux d'ébauche sur surfaces calaminées ou discontinues, à vitesse moyenne;

— *Nuance* S_3 pour travaux sans chocs sous faible vitesse de coupe et forte avance.

Pour les fontes et métaux non ferreux on emploie :

— *Nuance* G_1 pour les fontes douces, cuivre et alliages cuivreux, métaux légers;

— *Nuance* H_1 pour les fontes dures;

— *Nuance* H_2 pour les fontes très dures.

Les carbures métalliques doivent toujours travailler :

— à des vitesse comprises entre les vitesses limites provoquant leur rapide détérioration;

— à une vitesse constante et jamais en dessous de la vitesse limite inférieure;

— à sec ou sous arrosage constant;

— en taillant un copeau de section relativement faible.

Des abaques ou tableaux donnent, suivant les conditions de coupe, la vitesse optima de l'outil ou les corrections à apporter aux éléments de la passe pour que cette vitesse reste dans la zone des vitesses limites.

Imprimeries Oberthur — Dépôt légal imprimeur n° 8035